INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de **SCIENTIFIC AMERICAN**



ECOLOGIA DE LA SELVA TROPICAL

Enero 1985
350 PTAS.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Número 100
Enero 1985

INVESTIGACION Y
CIENCIA *Edición en español de* SCIENTIFIC AMERICAN

Colaboradores de este número:

Asesoramiento y traducción:

Pedro González Blasco: *Importancia de la investigación básica*; Manuel Puigcerver: *El firmamento en infrarojo*; Esteban Santiago Calvo: *Aterosclerosis, colesterol y receptores de LDL*; Luis Alonso: *Ecología de la selva tropical húmeda*; Amando García Rodríguez: *El láser C^3*; Rosa Sanz Serrano: *Viviendas de huesos de mamut en la llanura rusa*; Alfredo Morales Martínez: *Experimentos sobre estructuras góticas*; Luis Bou: *Juegos de ordenador*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio*.

Ciencia y sociedad:

José María López Piñero

Libros:

Luis Bru y J. M. Calleja, R. Miranda y N. Cabrera



LA PORTADA

La pintura de la portada muestra un naturalista suspendido entre la bóveda de la pluviselva tropical (véase "Ecología de la selva tropical húmeda, por Donald R. Perry, en este número). Lo sostiene un arnés de paracaidista enganchado a un tendido de sogas dispuesto a 30 metros sobre el nivel del suelo. La bóveda de la selva húmeda, la porción que va de los 10 metros a la copa de los árboles más altos, constituye su segmento de máxima riqueza biológica. La habitan múltiples especies sin dependencia del suelo, innumerables insectos y epífitos. Acoge igualmente las complejas interacciones entre fauna y flora que aprovechan los vegetales para su polinización y para la dispersión de sus semillas. El sistema de cuerdas y poleas diseñado por el autor permite el libre acceso a cualquier punto de la bóveda, hasta ahora inabordable al estudio.

Suscripciones:
Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
08029 Barcelona (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 33-37

Condiciones de suscripción:
España:
Un año (12 números): 3850 pesetas
Extranjero:
Un año (12 números): 33 U.S. $
Ejemplar atrasado ordinario:
350 pesetas
Ejemplar atrasado extraordinario:
450 pesetas

Distribución para España:
Distribuciones de Enlace, S. A.
Bruch, 49 - 08009 Barcelona

Distribución para los restantes países:
Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona

Publicidad:
Madrid:
Gustavo Martínez Ovin
Avda. de Moratalaz, 137 - 28030 Madrid
Teléfonos 430 84 81 - 437 12 91
Cataluña:
Lourdes Padrós
Manuel Girona, 61, 2.º - 08034 Barcelona
Teléfono 204 45 83

Controlado por O.J.D.



PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Pintura de la portada de Carol Donner

Página	Fuente	Página	Fuente
6	George V. Kelvin	72	Tom Prentiss
7	Quesada/Burke	75	Phillip A. Harrington
8-14	George V. Kelvin	76-82	Gabor Kiss
16	Jet Propulsion Laboratory	85-86	Patricia J. Wynne
18	Ian Worpole	87	Olga Soffer, Universidad de Wisconsin en Milwaukee
20-22	Jet Propulsion Laboratory	88-90	Patricia J. Wynne
24	Ian Worpole	93	Art Resource
25-26	Jet Propulsion Laboratory	94	Alan D. Iselin
31	L. Maximilian Buja, Hospital Clinico de la Universidad de Texas en Dallas	95	William W. Clark, Queens College, Universidad de la Ciudad de Nueva York (*arriba*); Robert Mark, Universidad de Princeton (*abajo*)
32-39	Bunji Tagawa	96-97	Alan D. Iselin
51-61	H. Pérez de Tejada y Joan Cotoner	98-99	Robert Mark, Universidad de Princeton
62	Observatorios Hale	100	Alan D. Iselin
65-66	Donald R. Perry	102-106	Ilil Arbel
67-69	Tom Prentiss	109	Jearl Walker
70-71	Donald R. Perry	110-113	Michael Goodman

ISSN 0210-136X
Dep. legal: B. 38.999-76
Fotocomposición Tecfa
Pedro IV, 160 - 08005 Barcelona
Fotocromos reproducidos por GINSA, S.A.
Imprime GRAFESA
Gráfica Elzeviriana, S.A.
Nápoles, 249 - Tel. 207 40 11
08013 Barcelona
Printed in Spain - Impreso en España

Los autores

LEON M. LEDERMAN ("Importancia de la investigación básica") dirige el Laboratorio del Acelerador Nacional Fermi (Fermilab) de Batavia, Illinois, y enseña física en la Universidad de Columbia. Formado en el City College de Nueva York y en Columbia, por la que se licenció en 1948, se recibió de doctor por esta institución en 1951. Desde ese año ha enseñado en Columbia y, desde 1962 hasta 1979, cuando tomó posesión de su puesto en el Fermilab, fue director de los Laboratorios Nevis de Columbia. Desde 1948 hasta 1978 trabajó activamente en la investigación de la física de altas energías en Nevis, en el Laboratorio Lawrence de Berkeley, el Nacional de Brookhaven, el Centro Europeo de Investigación Nuclear (CERN), de Ginebra, y el Fermilab. Entre sus muchos logros investigadores se cuentan el descubrimiento del mesón K neutro de larga vida, la partícula hypsilón y el quark "fondo" ("bottom").

HARM J. HABING y GERRY NEUGEBAUER ("El firmamento en infrarrojo") escriben en calidad de representantes del grupo científico de trabajo del *Satélite Astronómico Infrarojo* (*IRAS*), que presiden conjuntamente. Tienen especial interés en señalar que los descubrimientos recogidos en su artículo son obra de gran número de investigadores, la mayoría del equipo. Habing es profesor de astronomía de la Universidad de Leiden. Estudió en Groningen y pasó varios años en las universidades de Colorado en Boulder y de California en Berkeley. Neugebauer da clases de física en el Instituto de Tecnología de California, a la vez que dirige los observatorios del Monte Wilson y de Las Campanas. Formado en la Universidad de Cornell y en el CalTech, tomó parte en la primera exploración infrarroja del cielo a una longitud de onda de dos micrometros; ha realizado investigación radiométrica en el infrarrojo en misiones espaciales no tripuladas, comenzando con la sonda de Venus *Mariner 2*.

MICHAEL S. BROWN y JOSEPH L. GOLDSTEIN ("Aterosclerosis, colesterol y receptores de LDL") son profesores del Hospital Clínico de la Universidad de Texas en Dallas, del que Brown es además director de su Centro para el Estudio de Enfermedades Genéticas, y Goldstein director de su departamento de genética molecular. Brown se doctoró en medicina por la Universidad de Pennsylvania en 1966. Tras el período de residencia en el Hospital General de Massachusetts, de Boston, se dedicó a la investigación. Siete años pasó en el Instituto Nacional para el Estudio de la Artritis y Enfermedades Metabólicas y en el Laboratorio de Bioquímica del Instituto Nacional del Corazón de los Estados Unidos. Desde 1971 pertenece al claustro de la Universidad de Texas. Goldstein se licenció en medicina por ese mismo centro superior del sur, y completó su formación en el Hospital General de Massachusetts. Posteriormente se dedicó durante cuatro años a la investigación en el campo de la genética molecular, primero en el laboratorio de genética bioquímica del Instituto Nacional del Corazón y, después, en la división de genética médica de la Facultad de Medicina de la Universidad de Washington en Seattle. En 1972 se incorporó a la Universidad de Texas.

HECTOR PEREZ DE TEJADA ("Interacción entre el viento solar y la ionosfera de Venus") es graduado de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México y de la Universidad de Colorado, Estados Unidos, en donde obtuvo su doctorado en ciencias aeroespaciales. Es autor del modelo de interacción viscosa para la ionosfera del planeta Venus y ha sido investigador del programa *Pionero Venus* de la NASA, de los Estados Unidos. Preside la Unión Geofísica Mexicana y trabaja para el Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional de México en Ensenada, Baja California.

DONALD R. PERRY ("Ecología de la selva tropical húmeda"), biólogo especialista en polinización, ha centrado su interés en la biología de las comunidades que habitan en las bóvedas arbóreas. Cursó estudios en la Universidad estatal de California en Northridge, doctorándose por la de California en Los Angeles en 1983. Incansable fotógrafo de la vida tropical, pronostica: "El medio constituirá una fuente inapreciable de información para los futuros investigadores, especialmente si esos ecosistemas llegan a extinguirse". Perry trabaja en la preparación de una obra divulgativa, profusamente ilustrada, sobre la bóveda de la pluviselva, de próxima aparición.

W. T. TSANG ("El láser C^3") es miembro del departamento de investigación de electrónica de semiconductores de los laboratorios Bell de la AT & T en Murray Hill, Nueva Jersey. De origen chino, cursó estudios de licenciatura en el Instituto de Tecnología de Georgia, doctorándose en 1970, en ingeniería eléctrica, por la Universidad de California en Berkeley. Ese año se incorporó a los laboratorios Bell. Desde entonces ha investigado sobre láseres de semiconductor y haces moleculares de los compuestos III-V y ha desarrollado diferentes dispositivos electrónicos y fotónicos.

MIKHAIL I. GLADKIH, NINELJ L. KORNIETZ y OLGA SOFFER ("Viviendas de huesos de mamut en la llanura rusa") colaboran en excavaciones de yacimientos del Paleolítico superior de la Unión Soviética, Kornietz en calidad de paleontólogo y, sus colegas, como arqueólogos. Gladkih enseña arqueología en la Universidad estatal de Kiev. Se doctoró por el Instituto de Arqueología de Leningrado, en 1973. Se ha especializado en el análisis y tipología de los utensilios de piedra. Kornietz es directora del departamento de paleontología del Instituto de Zoología de Kiev. Se doctoró en 1962 con una tesis sobre la extinción de los mamuts en Ucrania; ha excavado yacimientos de restos de esos animales por toda la llanura central rusa. Soffer enseña arqueología en la Universidad de Wisconsin en Milwaukee. Estudió en el Hunter College y en la Universidad de la Ciudad de Nueva York, por la que es doctora desde febrero de 1984.

ROBERT MARK y WILLIAM W. CLARK ("Experimentos sobre estructuras góticas") son, respectivamente, profesor de ingeniería civil y arquitectura de la Universidad de Princeton y profesor de arte del Queens College de la Universidad estatal de Nueva York. Mark estudió ingeniería civil en la Universidad de la Ciudad de Nueva York; tras su graduación, en 1952, trabajó en el análisis de presiones en la división de energía nuclear de la Combustion Engineering Inc. Ingresó en Princeton en 1957 para investigar en ingeniería; desde entonces ha aplicado las técnicas del análisis de ingeniería a estructuras históricas, desde las iglesias de Christopher Wren hasta los edificios públicos de la Roma imperial. Clark se recibió de doctor por la Universidad de Columbia en 1970. Sus trabajos más recientes se han centrado en el desarrollo del estilo gótico y su relación con el primer románico inglés y francés.

Hace...

José M.ª López Piñero

... cuatrocientos años

Murió Andrés Alcázar, autor de la obra sobre cirugía craneal más importante de la Europa del siglo XVI.

Nacido en Guadalajara hacia 1490, Alcázar estudió medicina en la Universidad de Salamanca y ejerció después la profesión en su ciudad natal y también en Avila y Segovia. Al crearse la cátedra de cirugía en la universidad salmantina, en 1567, fue nombrado titular de la misma. A edad ya muy avanzada, publicó reunida la producción escrita de toda su vida con el título de *Chirurgiae Libri Sex* (1575).

La parte más destacada de la obra de Alcázar es su primer tratado, consagrado a la cirugía craneal ("De vulneribus capitis"). Al parecer, fue reimpreso aisladamente cinco años después de la edición original, lo que demuestra que fue también la más apreciada de su época. Recoge este texto muchas innovaciones relacionadas con el tema que había ido introduciendo durante los cincuenta años anteriores. Sabemos que en 1514 había fabricado ya los instrumentos de su invención y que a la difusión de los mismos en Italia y en Francia contribuyó el médico y humanista Luis Lucena y, más tarde, el protocirujano francés Louis Debourges, que vino a España acompañando a Francisco I en 1525.

En los veinticinco capítulos de que consta esta parte de su libro, realiza Alcázar dos aportaciones fundamentales. La primera consiste en un detenido estudio diagnóstico de las heridas cefálicas. Fue la más completa exposición sobre el tema publicada en la Europa del siglo XVI, superior a la de Ambroise Paré y Andrea della Croce, que le aventajan en cambio en lo referente al instrumental. Alcázar considera que no basta la consideración externa de la herida y de los signos locales relativos a la profundidad de la fractura, la presencia de hemorragia intracraneana, colección de pus, punzamiento de la duramadre, etcétera. El aspecto más fértil de su estudio es el gran relieve que concede a los síntomas neurológicos y la valoración que hace de ellos: "Hablaremos ahora de los signos que dan a entender el hecho de haber sido heridas las membranas del cerebro.

"En primer lugar, el dolor y el vértigo se presentan con más fuerza que en la mera fractura del cráneo. El rostro y los ojos enrojecen y la misma cara se llena de pústulas, debido a la inflamación que se produce en el cerebro y sus membranas por la conexión de los músculos con el cráneo, o por la comunicación del daño de las membranas del cerebro y de los nervios que parten de él a la garganta, el tórax y los órganos de la respiración. De ahí que se produzca un jadeo tan frecuente y maligno que, por la ansiedad de la respiración, enrojece el rostro y brotan las pústulas.

"Los ojos, además de enrojecer, se hinchan y oscurecen, debido a la relación que tienen sus membranas con las del cerebro. En efecto, la membrana conjuntiva del ojo tiene su origen en el periostio, la córnea en la duramadre, la úvea en la piamadre y el nervio óptico en la aracnoide.

"La sangre sale al exterior por la boca, la nariz o los oídos, como... vimos en cierto herido con fractura penetrante e incisión de la duramadre del cerebro. No sólo arrojaba la sangre por los oídos, sino sanies y la leche de mujer que se le puso sobre la herida.

"Las potencias del cerebro se lesionan y el enfermo se torna estúpido y como amedrentado; permanece inmóvil a causa del daño del cerebro, de donde parten los nervios por los que se distribuye la sensibilidad y el movimiento a todas las partes sensitivas y motrices. De ahí que Hipócrates diga que en el golpe de la cabeza, la estupidez y el delirio es mala señal.

"El enfermo suele tener fiebre debido a la conmoción de los humores y de los espíritus, los cuales se dirigen, encendidos, al corazón, sede del calor innato, lo inflaman y con ello a todo el cuerpo. Si los escalofríos no preceden a la fiebre, no se ha de considerar a ésta mortal, como lo sería si le precedieran escalofríos frecuentes y desordenados. Pues éstos amenazan convulsión. No sólo los escalofríos son signos de convulsión, sino los bostezos y desperezos, si fueran muy frecuentes, ya que son especies de aquéllos.

"Los escalofríos indican la presencia de una materia asentada sobre las membranas del cerebro, que cuando la naturaleza se esfuerza por expulsar origina la rigidez y el temblor, a los que va unida la febrícula. Por lo que Hipócrates dice que el escalofrío es mortal cuando se presenta con fiebre y mucha debilidad de fuerzas.

"El enfermo se envara, es decir, se le ponen tensas la cerviz y las maxilas. Este síntoma, por testimonio de Celso y por la misma experiencia, se considera mortal, sobre todo si se presenta al cabo del tiempo y no al principio.

"Los insomnios atormentan, porque al conciliarse el sueño en el cerebro y estar éste lesionado, el enfermo se ve obligado a velar o a dormir mal.

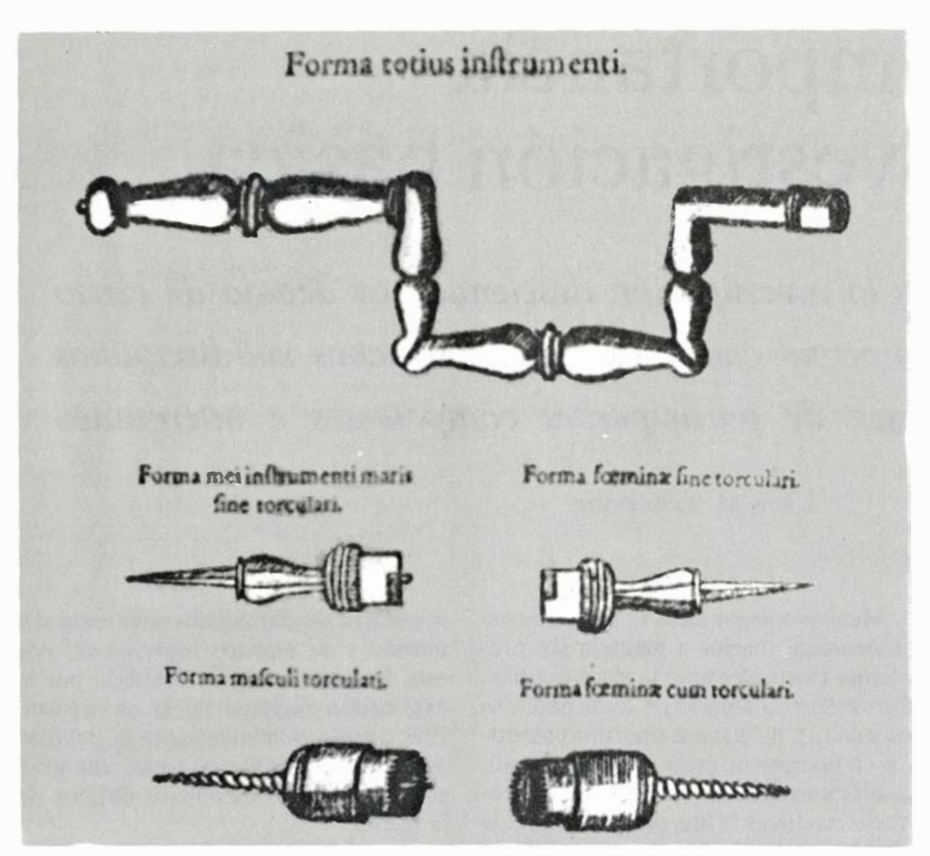
"La comida repugna y el enfermo la vomita por la incapacidad del estómago, cuyo principal nervio sensitivo comunica con el cerebro. Pues si el vómito se produce con sólo la fractura del cráneo, mucho más con la incisión de las membranas del cerebro.

"Estas cosas aparecen sobre todo cuando la herida asienta en la parte anterior de la cabeza, pues de ahí procede el nervio antedicho; por eso en la herida occipital esos síntomas no aparecen en la misma manera.

"El enfermo defeca y orina mal. Puede ser eso por varios motivos: bien porque el calor fértil seca los humores que hay que echar y daña los procesos naturales, o porque se suben las materias y los vapores de la cabeza dañada, o porque, enajenado, el herido se olvida de orinar y defecar, como dice Avicena, o por incapacidad de la fuerza expulsora de la vejiga, de los músculos y de los nervios que proviene de la conexión y afinidad de los músculos, o por una cierta disposición a la convulsión, que es la causa de que no se defeque u orine o de que se haga mal".

Todo ello le sirve a Alcázar para sentar las indicaciones de la trepanación, que limita a los cuadros clínicos en los que resulta evidente la hipertensión craneal, la hemorragia intracraneal y la presencia de abcesos o de fragmentos óseos que desgarren o puncen las membranas cerebrales.

La segunda aportación consiste en el análisis de las condiciones que deben reunir los trépanos y el resto del instrumental operatorio, así como en la descripción de los que él había diseñado. Considera inadecuados los trépanos habituales en su ambiente, que eran las llamadas "trefinas" o coronas de trépano accionadas directamente con la mano, mediante una especie de asa colocada en la parte superior del vástago que las sostiene. Alcázar denuncia sus peligros y propone, para superarlos, los trépanos de su invención. Consisten éstos en coronas de trépano insumergibles mediante un tope; como era habitual desde Celso, son una corona macho con un pivote central que garantiza la fijeza del instrumento al comenzar la operación, y otra corona hembra, con la que se termina de perforar y que carece de dicha clave para evitar los riesgos de punción. Las coronas no se hacen girar directamente con la mano, sino mediante un manubrio como el de los berbiquís de los carpinteros. El catedrático salmantino solucionó el pro-



Uno de los instrumentos inventados por Andrés Alcázar para la trepanación craneal. Grabado de su obra **Chirurgiae Libri Sex** *(1575). "Perforar sin peligro con un mismo instrumento los huesos del cráneo –afirma Alcázar al pie de esta figura– es muy difícil y quizá imposible, debido a que difieren en consistencia y espesor, a no ser que se disponga de unos instrumentos más cortos y otros más largos, como aconseja Galeno, lo que lleva mucho tiempo. Así pues, tras muchas noches de insomnio, encontré al fin el procedimiento de poder perforar con un solo instrumento tanto el hueso consistente como el débil; dicho instrumento sólo difiere del modiolo o la baptista en que el hierrecillo circular con el que se hace la perforación está formado por dos varillas contiguas unidas en forma de rosca con lo que el hierrecillo puede, según los casos, alargarse o acortarse con gran precisión. Los instrumentos citados son únicamente adecuados para las fracturas que penetran hasta el interior del cráneo, extrayéndose con ellos la rodaja íntegra del hueso. Para las fracturas dudosas que deben ser exploradas con la tinta y la frotación, construí por mí mismo otros instrumentos, sólidos, planos, delicados y afilados. El macho, con una pequeña punta sobresaliente en el centro para perforar la primera tablilla del cráneo, y que no resbale el instrumento; y la hembra sin esa punta. Se manejan dándoles vueltas como los otros, o en el mismo manubrio por medio del vástago con rosca o sin él, como en esta figura".*

blema de disponer de un numeroso juego de coronas de acuerdo con el espesor del hueso que había que trepanar, mediante un dispositivo en forma de tuerca que permitía alargarlas o acortarlas según la circunstancia. Para los casos especialmente delicados inventó un segundo tipo de trépano, también con dos coronas, macho y hembra, pero desprovistas de dientes y con sólo un borde cortante y afilado; para hacerlas girar, utilizaba un dispositivo semejante a la ballesta de tornero, que gira a impulsos de una correa o cuerda de un arco y que venía siendo utilizado para las "terebras" o trépanos perforativos desde la Antigüedad.

Los cinco "libros" restantes de la obra de Alcázar están dedicados a las heridas de los nervios y tendones, del tórax y del abdomen, a la sífilis y a la prevención y tratamiento de la peste. Sobresale la atención que dedica a la extracción de colecciones de pus en la cavidad torácica. Inventó para ello un instrumento que succionaba el pus, impidiendo al mismo tiempo la entrada del aire en el interior del tórax, y que servía también para inyectar medicamentos.

La base doctrinal de la obra de Alcázar continuaba en buena parte anclada en la sistematización del galenismo por Avicena, que combina con frecuentes referencias directas a textos galénicos e hipocráticos.

Importancia de la investigación básica

Si el apoyo económico a la investigación desciende por debajo de cierto umbral, la ciencia fundamental caerá en picado. Muchas subdisciplinas desaparecerían por escasez de participantes competentes e interesados

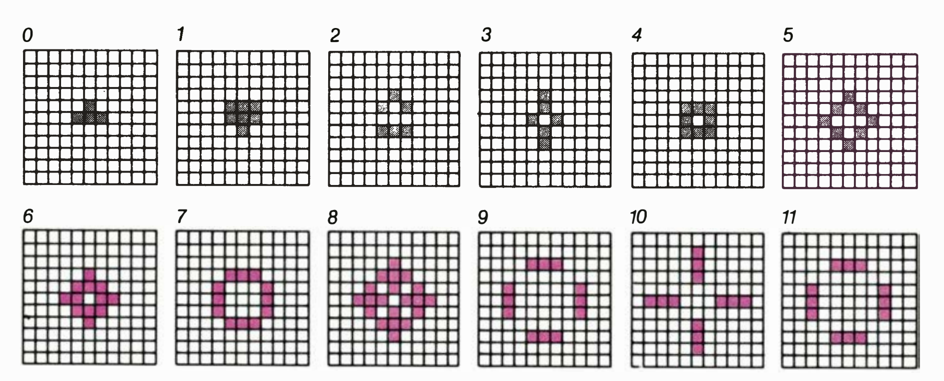
Leon M. Lederman

Tomamos la ciencia básica prescindiendo del puro deleite intelectual, del gozo de aumentar el acervo cultural, del respeto a la herencia que nos transmiten generaciones de maestros y de la necesidad de publicar so pena de perecer. Cuando el coste de seguir adelante con esta empresa es alto, ha llegado el momento de preguntar por qué la sociedad debe sostenerlo.

Y la respuesta es ésta: el apoyo a la ciencia fundamental –matemáticas, astronomía, ciencias físicas y biológicas– produce beneficios muy rentables. Estos podrían clasificarse atendiendo al tiempo necesario para transferirlos a la sociedad. Los beneficios más importantes son los culturales, pero requieren también un proceso de maduración más largo y complicado. Los beneficios directos, en los que el objeto de la investigación científica se transfiere a algún uso práctico, suelen tardar unos 30 años en llegar. Recuérdese a este propósito el caso de la resonancia magnética nuclear (RMN); descubierta en la década de los 40, su comercialización como instrumento de representación médica empezó en los 70. Los primeros beneficios sociales en alcanzarse suelen ser indirectos, como el giro tecnológico. Estos beneficios aparecen cuando se considera que determinada solución de ciertos problemas podría guardar relación con un campo concreto de aplicación. Verbigracia, la aplicación a un colector de energía solar de un aparato diseñado para la recogida y concentración de la luz extremadamente tenue emitida por partículas elementales al atravesar un medio. Disputan los economistas sobre el procedimiento correcto para medir la influencia de la ciencia fundamental en la economía; lo que no obsta para que se estén llevando a cabo los cálculos estimativos. Examinaré alguno de estos beneficios.

Muchos colegas míos se muestran extrañamente reacios a plantear los problemas culturales ante la clase política. Pertenecen al ámbito de la filosofía, se escudan, y no parece oportuno airearlos en tiempos de crisis. Además, resulta difícil establecer la fracción del producto nacional bruto que corresponde al valor cultural de la ciencia. Dentro de la comunidad científica, sin embargo, mucha gente reconoce que el aspecto más importante de la ciencia es el cultural. Todo el mundo comparte la necesidad de dar cuenta coherente del mundo y de nuestro lugar en él; por eso, la sociedad se ha decidido por la explicación racional de la naturaleza. Esta opción demanda, ante la pobreza de lo que se venía creyendo, una gran confianza en los beneficios últimos de la razón.

De éstos, uno de los más importantes se deriva de la actividad científica misma. Un ejemplo de la clase de conducta racional en que está compro-



1. FORMAS DEL CRECIMIENTO PRISMATICO sobre la superficie de la concha de la oliva (*ilustración inferior de la página opuesta*). Muestran un parecido sorprendente con las formas generadas siguiendo unas sencillas reglas de la evolución de un autómata celular unidimensional (*ilustración superior de la página opuesta*). Formas similares en *V* se aprecian también en la superficie de una corriente. Stephen Wolfram, del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, ha sugerido que el estudio de autómatas celulares unidimensionales puede redundar en un mayor conocimiento de la turbulencia, el flujo caótico de un gas o un líquido. La historia de este ejercicio intelectual compendia el camino en que un ejercicio abstracto de ciencia básica aboca inesperadamente en la comprensión de algún aspecto del mundo natural. El estudio de los autómatas celulares unidimensionales fue estimulado por un interés recreativo extraordinario de los científicos, matemáticos e informáticos en "el juego de la vida". La atracción del juego da fe del regusto que producen los problemas abstractos: las reglas de la vida son de fácil comprensión y la sinuosidad y belleza de las formas que generan recompensan la atención prestada por las mentes más sutiles. Las personas jóvenes se sienten atraídas por el problema; una comunidad amplia comparte las nuevas configuraciones, cada vez más interesantes. En el juego, uno sigue la evolución de ciertas "formas vitales", como la mostrada en el cuadro 0 de la ilustración superior. El coloreado de cada casilla o cuadrícula en cualquier cuadro depende sólo de la coloración de las ocho casillas que lo rodean en el cuadro precedente. Puesto que cada fase del juego de la vida tiene una forma bidimensional, Wolfram sugirió que se podría avanzar más en el estudio de tales formas limitando inicialmente el estudio a las casillas alineadas. En el autómata celular unidimensional indicado, cada fase evolutiva es una fila de casillas coloreadas; las filas se despliegan de arriba abajo. El color de cada casilla dependerá sólo del color de las tres celdillas más cercanas de la fila inmediatamente superior. Si el trabajar con autómatas celulares unidimensionales nos lleva a una mejor comprensión de la turbulencia, ese conocimiento será de un valor incalculable para el estudio de fenómenos tales como el clima, las olas del océano, el diseño de láminas de aire, el flujo de los líquidos en una tubería y la dinámica de la materia en el interior solar.



metida nuestra sociedad es el estudio de las regiones, aparentemente remotas y exóticas, del espacio interior y exterior. Queremos intervenir ahí en la medida de nuestras posibilidades. Y vamos descubriendo sorprendentes conexiones: se encuentran moléculas orgánicas en el espacio; haces de neutrinos que surgen de los aceleradores de partículas pueden cambiar nuestras ideas sobre la evolución del universo. Tales conexiones apoyan la idea de unificación, común a muchas culturas, que pusieron de manifiesto con claridad inigualable los filósofos griegos: existe una sola y simplificadora ley de la naturaleza, válida para todo el universo y para todos los tiempos. Cuya búsqueda han emprendido y postulado todas las naciones y todos los credos. La idea de la unidad de la ciencia ha constituido un factor destacado en el desarrollo de la unidad de la humanidad, idea que guía a cuantos luchan por la mutua comprensión internacional en estos azarosos tiempos.

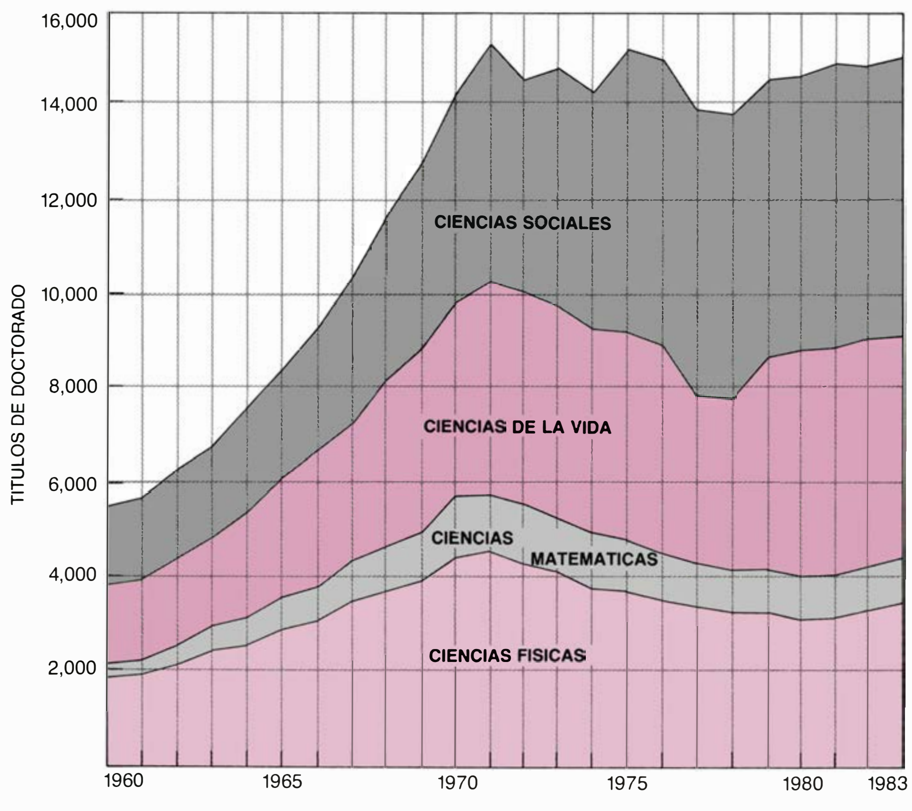
De lo anterior se sigue que la sociedad debe preocuparse por la ciencia de la misma forma que cultiva otras actividades intelectuales creadoras, como el arte, la música y la literatura. Como el arte, la ciencia se torna cultura cuando sus principios básicos o su forma de ver el mundo, apropiados, se aplican a un contexto social más amplio. La imagen de la Tierra como una nave espacial refinada, que expresa una visión humilde de nuestro planeta, una apreciación de nuestro lugar en él y una preocupación por la protección del ambiente, no podía idearse antes de que Copérnico la desplazara de su posición central en el universo, hace más de 400 años. La visión científica contribuye poderosamente a la ilustración general, y así ha ocurrido siglo tras siglo. Keith Thomas escribiendo en su libro *Religion and the Decline of Magic*, sobre la abolición de las leyes de brujería en la Inglaterra de 1736, llama la atención sobre el comentario de Richard Bentley acerca del importante papel desempeñado en este progreso por el desarrollo de la filosofía natural: "¿Qué ha hecho disminuir en Inglaterra las consejas e historias de brujas? No creamos que haya sido la creciente secta de librepensadores, sino el crecimiento de la Filosofía y de la Medicina. No hay que agradecérselo a los Ateos sino a... los Boyle y los Newton".

Dentro de las mismas ciencias hay dos importantes efectos culturales de la investigación fundamental que se suman significativamente a la calidad de las contribuciones prácticas que la ciencia puede aportar a la sociedad. Uno es su propio atractivo cultural, que ha arrastrado las mentes mejor dotadas hacia el trabajo científico. Aunque la obtención de una fuente de energía más barata y limpia constituya un reto para los investigadores de hoy, a los estudiantes mejores, a los más brillantes, les mueven otros incentivos: el rompecabezas de la antimateria o la teoría de la gran explosión originaria del universo.

El segundo efecto cultural de la investigación básica, dentro de la propia ciencia, es el de mantener el espíritu de la comunidad científica. El éxito de la ciencia fundamental establece pautas de alcance general y aporta un "corpus" de conocimiento compartido que puede someterse a juicio y al que otros trabajadores pueden contribuir desde múltiples campos especializados. Un buen ejemplo de la marcha cultural es la historia del desarrollo de uno de los descubrimientos tecnológicos esenciales del siglo xx, el transistor. El trabajo que condujo al descubrimiento del transistor en 1947 pretendía fabricar elementos activos de circuitos de estado sólido. Mas, para llegar ahí resultó decisivo la aplicación que Alan H. Wilson hiciera de la mecánica cuántica a la explicación de la estructura en bandas electrónicas de los semiconductores.

Así lo cuenta Walter H. Brattain, de los laboratorios de la Bell Telephone: "El transistor se consiguió porque el conocimiento básico se había desarrollado hasta una fase en que la mente humana podía comprender un fenómeno que había sido observado mucho tiempo antes. En el caso de un aparato de tanta trascendencia tecnológica vale la pena recordar que derivó del trabajo empeñado en desentrañar fenómenos físicos fundamentales, y no del método habitual de ensayo y error hasta producir un instrumento útil".

El transistor constituye un claro ejemplo histórico de un beneficio directo de la investigación fundamental. Pero, ¿qué ocurrirá en el futuro? Extrapolar desde las cuestiones ceñidísimas de la investigación científica en curso hasta la explotación técnica del mañana viene a ser como recrearse en una grandiosa fabulación. Colegas muy responsables eluden, por sistema, ese riesgo. Se recuerda el resbalón de Ernest Rutherford: "Cualquiera que espere obtener una fuente de energía de la transformación de estos átomos está



2. EL NUMERO DE DOCTORADOS concedidos anualmente en una ciencia es un buen índice de la salud de la disciplina. El gráfico muestra que el número de nuevos doctorados ha permanecido constante en los Estados Unidos durante la última década de las ciencias sociales, físicas y matemáticas desde un máximo alcanzado a principios de la década de los setenta. Un lento crecimiento indica una disciplina en un estado de perfecta salud. El bajo nivel actual de nuevos doctorados puede tener serias consecuencias. Los datos proceden de *Science Indicators, 1982*. (En España no hay todavía estadísticas elaboradas.)

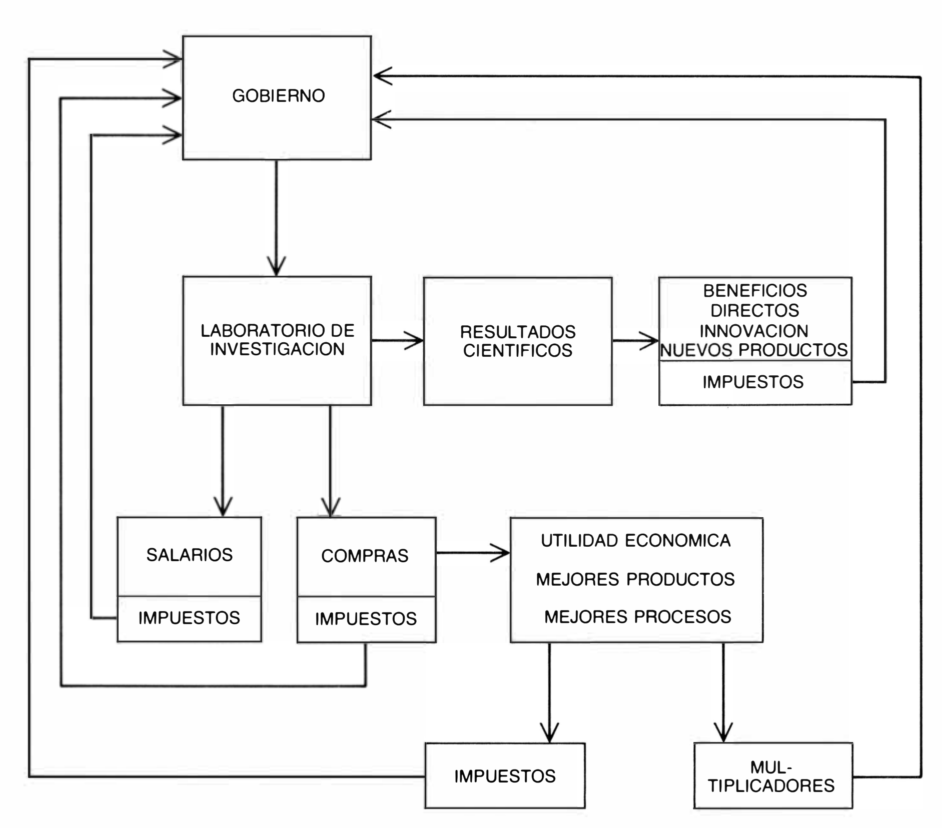
viendo visiones". No pasarían cinco años antes de que se demostrara la fisión. Pero si hemos de aprender de la historia, nos sentiremos apoyados a la hora de proponer algunas aplicaciones de la ciencia, tan notables al menos como muchos de nuestros milagros tecnológicos pudieran parecérselo a un sabio del siglo XVIII. Para orientar el análisis me limitaré a mi propia disciplina, la física de partículas de altas energías, una parcela alejada de cualquier aplicación verosímil, a primera vista.

Pero un beneficio potencial de la física de partículas de altas energías sería la generación de energía económica y útil. La cantidad de energía liberada por una reacción química ordinaria, así la combustión de carbón o petróleo, se ha comparado desfavorablemente en muchas ocasiones con la energía liberada por una reacción nuclear, la fusión por ejemplo; esta última libera unos cuatro millones de veces la energía conseguida quemando una unidad de masa de combustible. Sin embargo, de acuerdo con la fórmula de Einstein sobre la equivalencia de masa y energía, la fusión libera solamente la quingentésima parte de la energía total encerrada en cualquier masa en reposo. Según una de las implicaciones más interesantes de los últimos hallazgos, existirían procesos naturales capaces de liberar casi toda la energía que encierran esas masas en reposo.

En 1973 T. D. Lee y Gian Carlo Wick, de la Universidad de Columbia, señalaron que las masas en reposo de los nucleones (neutrones y protones) enlazados juntos en un núcleo atómico podrían repentinamente reducirse a una pequeña fracción de su valor normal si se comprimieran los núcleos hasta traspasar un umbral de densidad extraordinariamente alta. El resultado debería ser la radiación de unos mil millones de electronvolt de energía por nucleón.

Podría imaginarse una forma menos rigurosa de causar tales condiciones: haciendo que núcleos de uranio, u otros tan pesados como ellos, colisionaran a altas velocidades. Los choques elevarían transitoriamente la densidad de la materia nuclear más allá del punto crítico en que se produce la reacción. Si cualquier masa de materia dada pudiera ser organizada de suerte que todos sus nucleones constituyentes fueran a experimentar la reacción, la energía necesaria para abastecer el mundo del año 2000 podría obtenerse de unas pocas toneladas de agua.

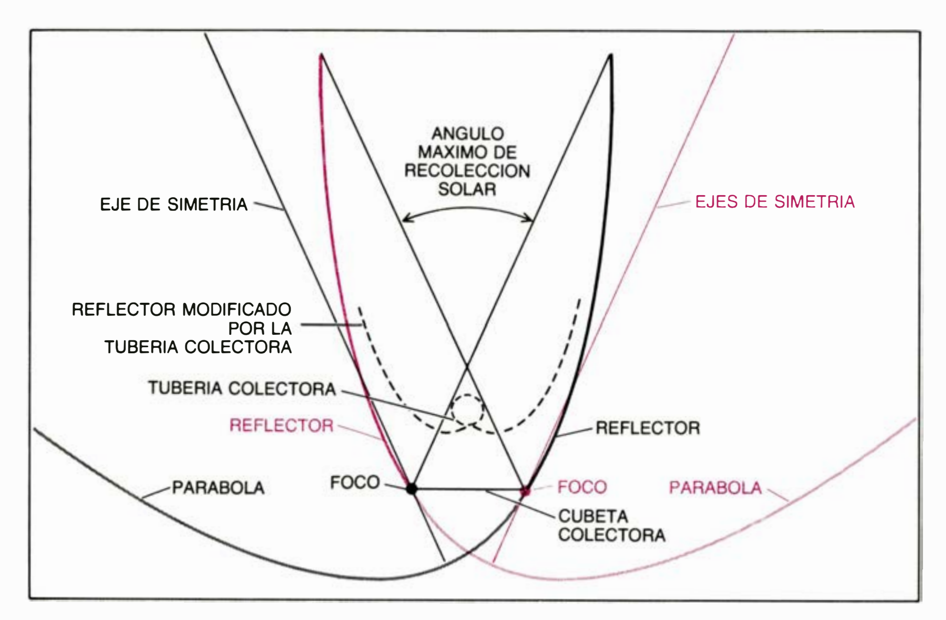
Otra reacción que podría transformar casi toda la masa en energía es la desintegración del protón, desintegración que predicen las así llamadas grandes teorías de unificación, en cuya virtud se explican la interacción fuerte, la débil y la electromagnética. Si tales teorías son correctas, la materia ordinaria es inestable. Ahora bien, la velocidad esperada de desintegración es tan lenta que solamente podrían hacerlo cada año unos pocos protones en 10.000 toneladas de materia. De momento, ninguna observación clara de la desintegración del protón se ha logrado.

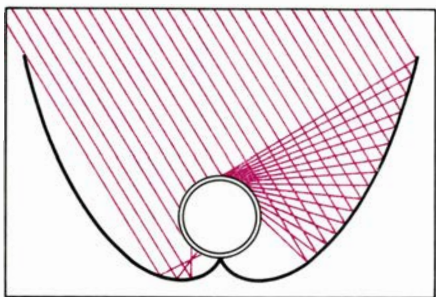


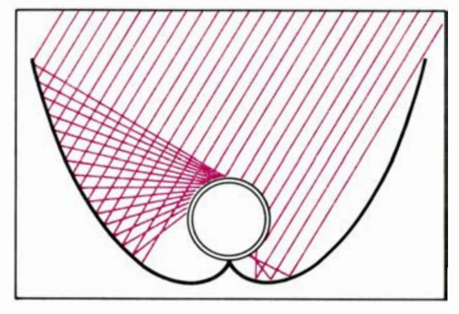
3. UN LABORATORIO DE INVESTIGACION, como cualquier otra institución sostenida con fondos públicos, gasta su dinero en salarios y compras; con multiplicadores apropiados se tasan esos gastos, y así una parte de los fondos de sostenimiento vuelven a Hacienda. Si el trabajo del laboratorio da lugar a un producto o a una información a partir de la cual se desarrolla un producto, se generan nuevas fuentes de devolución. Por ejemplo, el estudio de la resonancia magnética nuclear (RMN) en los años cuarenta indujo a la fabricación de instrumentos de imagen que habrían de generar cientos de millones de dólares de impuestos hacia finales de nuestra década. Una reintegración indirecta de fondos resulta de la colaboración entre el laboratorio y la industria: las necesidades del laboratorio cambian a menudo la capacidad de la industria para producir ciertos bienes y servicios. Tales cambios rinden a veces beneficios más altos y aumenta así la devolución al Tesoro en concepto de impuestos. Los efectos de la colaboración pueden también propagarse a través de la economía: aumentando la oferta de empleo y reclamando nuevas materias primas, lo que se traduce en nuevas cotizaciones al fisco. Por ejemplo la necesidad de imanes superconductores en los aceleradores del laboratorio Fermi y del laboratorio de Brookhaven ha conseguido mejoras en el cableado superconductor que aporta la industria. La nueva capacidad industrial puede contribuir, a su vez, a la construcción de mayores imanes superconductores, más baratos también, para la representación RMN, el estudio de la fusión, el ferrocarril, etcétera. El organigrama adapta los resultados de un estudio del servicio económico del CERN, el laboratorio europeo para la física de partículas.

En torno a esta cuestión relativa a la generación de energía hay un punto a destacar: admitamos la desintegración del protón, ¿podría cambiarse ésta al alterar el contexto? En principio la respuesta es afirmativa. La desintegración del protón debería producirse con frecuencia cuando las temperaturas de la materia se acercaran a los 10^{29} grados Celsius. De acuerdo con los cosmólogos que aplican las grandes teorías de unificación al estudio del universo primitivo, el universo gozó de esa temperatura al menos hasta unos 10^{-32} segundos después de la gran explosión. Las colisiones de las partículas de alta energía en los aceleradores simulan condiciones próximas a los 10^{-13} segundos tras el comienzo de la gran explosión; sin embargo, el alcanzar la temperatura crítica para la desintegración del protón es aún una meta lejana.

Esta limitación no excluye la posibilidad de que otros cambios microscópicos en el entorno pudieran conducir a una velocidad superior de desintegración del protón. Hace unos años, varios físicos y cosmólogos apuntaron la posibilidad de que la reacción podría venir catalizada por la presencia de un monopolo magnético, una partícula insólita predicha por las grandes teorías de uni-







4. BENEFICIO INDIRECTO de una técnica cuyo diseño original pretendía detectar partículas elementales. Se trata de un aparato estacionario que recoge energía solar sin tener que seguir el movimiento diario del Sol. El colector, que se designa como un concentrador parabólico compuesto, se basa en la geometría de dos parábolas intersecantes: la gris y la coloreada mostradas en el recuadro superior. Todos los rayos de luz que entran en el colector procedentes de una dirección paralela a los ejes de simetría de la parábola coloreada saltan de la superficie del reflector de color oscuro y se encuentran en el foco coloreado. Los rayos de luz procedentes de direcciones entre la dirección del eje de simetría coloreado y la vertical son reflejados hasta algún punto a lo largo de la cubeta colectora. De manera similar, la luz procedente de direcciones entre la vertical y una dirección paralela a los ejes de simetría de la parábola gris o bien se reflejan hacia la cubeta colectora o bien se interceptan directamente por ella. Así, toda la energía solar que penetra en el colector se concentra a lo largo de la cubeta o, si la forma del reflector se modifica ligeramente, en una tubería con agua que puede almacenar la energía en forma de calor. En los dos recuadros inferiores se muestra cómo se concentra la energía solar en la tubería para dos posiciones diferentes del Sol. El aparato fue inventado por Roland Winston para detectar la radiación de Čerenkov, una débil luz azulada originada por ciertas partículas durante su paso a través de un medio.

ficación. De acuerdo con cálculos recientes de Curtis Callan, de la Universidad de Princeton, los efectos de un monopolo se extienden a un volumen mucho más amplio de lo que se suponía. Si se impulsara un protón hacia ese volumen, el monopolo absorbería el protón en su interior, instando la desintegración del mismo. Pero los monopolos magnéticos siguen sin dejarse ver. Las teorías de gran unificación establecen que son tan pesados que la mayoría de los monopolos de la Tierra podrían haberse sumergido ya en el núcleo de la misma; altas concentraciones de monopolos pueden también encontrarse en la materia superdensa de una estrella de neutrones. Por consiguiente, si los monopolos magnéticos existen realmente, el principal problema que se plantearía en la extracción práctica de energía de la desintegración del protón residiría en la dificultad que entrañase el beneficio o explotación "minera" de monopolos catalíticos.

Un tercer proceso que saca energía de la masa es la interacción de la materia con la antimateria. Sabido es que, si la materia y la antimateria se ponen en contacto, se aniquilan entre sí. La masa de la materia y de la antimateria se convierten, casi por entero, en energía. Las antipartículas mantenidas en aislamiento de la materia ordinaria por un fuerte campo magnético constituyen, por tanto, una especie de batería de almacenamiento, una forma compacta para guardar grandes cantidades de energía que podrían liberarse a un ritmo controlado. En 1977, el Laboratorio de Propulsión a Chorro del Instituto de Tecnología de California publicaba un informe donde se abordaba la aplicación de ese ingenio a los viajes espaciales.

Pero ocurre que no es fácil generar, y almacenar, antipartículas. En el Laboratorio Nacional del Acelerador Fermi (Fermilab), mis colegas están diseñando una máquina que generará antiprotones estrellando un haz de protones contra un blanco estacionario, de tungsteno. Los antiprotones se recogerán y almacenarán en un anillo magnético. Podrán ser entonces acelerados y colisionar con un haz de protones que viaje en sentido opuesto, para así poder estudiar los sistemas físicos en una energía extremadamente alta. Aunque nuestro diseño permitirá obtener un gran número de antiprotones, un aparato práctico para almacenar energía requeriría un haz de antiprotones un millón de veces más intenso que el nuestro, por lo menos.

En 1956, Luis W. Alvarez y sus colaboradores, de la Universidad de California en Berkeley, descubrieron inesperadamente un mecanismo por medio del cual se podían poner en marcha reacciones de fusión a bajas temperaturas y así liberar grandes cantidades de enegía. Observaron varias trazas extrañas dejadas por partículas elementales en una cámara de burbujas llena de hidrógeno. Las trazas se producían a raíz de la formación de una molécula compuesta de un protón, o núcleo de hidrógeno, y un núcleo de deuterio, que es un isótopo pesado del hidrógeno, cuyo núcleo consta de un protón y un neutrón. Los dos núcleos estaban enlazados por un muon cargado negativamente, que en el enlace desempeña el papel que el electrón hace en una molécula ordinaria; la molécula resultante tenía una sola carga negativa.

La propiedad más importante de la nueva molécula es su tamaño. Dado que el muon es 200 veces más pesado que el electrón, los núcleos de hidrógeno y de deuterio están así 200 veces más cerca uno de otro en la nueva molécula que cuando el enlace lo efectúa un electrón. La proximidad de los núcleos les permite fusionarse a temperaturas terrestres normales para formar el núcleo de helio-3, un isótopo del helio; la reacción produce cerca de cinco millones de electronvolt (MeV) de energía. Aun más, el muon salta y queda libre para catalizar otra reacción de fusión.

Alvarez describió así sus observaciones en 1972: "Un rayo de tranquilizadora esperanza pasó por nuestra mente

cuando pensamos que habíamos resuelto para siempre los problemas del combustible de la humanidad. Unos pocos y sencillos cálculos nos indicaron que, en HD [hidrógeno y deuterio] líquido, un solo muon negativo podría catalizar bastantes reacciones de fusión antes de desintegrarse para aportar la energía que operara el acelerador y pudiera producir nuevos muones, con la energía que quedara después de producir el HD líquido con agua del mar. Mientras los demás habían tratado de resolver este problema calentando plasma de hidrógeno hasta millones de grados, nosotros habíamos tropezado con la solución... utilizando en cambio bajas temperaturas".

Un análisis detallado mostró que los cálculos iniciales eran erróneos. Posteriormente se encontró que en la cámara de burbujas de hidrógeno sólo podían catalizarse cinco reacciones de fusión antes de que el muon experimentase su desintegración radiactiva. Sin embargo, varios teóricos, incluido el propio Andrei D. Sakharov, hablaron, ya en las postrimerías de los años 40, de la posibilidad de que tal proceso catalizara reacciones de fusión suficientes para mantener la energía del acelerador, con tal de que la naturaleza aportara una partícula pesada y estable similar al electrón. Hasta hace poco se aceptaba que el muon tenía una vida muy corta, presunción que acaba de ponerse en duda.

Dos años atrás, Steven E. Jones, del Laboratorio Nacional de Ingeniería de Idaho, demostró una intensificación de la resonancia de las propiedades catalíticas del muon en mezclas presurizadas de deuterio y tritio, otro isótopo pesado del hidrógeno. Nada menos que 100 reacciones de fusión fueron catalizadas por un solo muon; cada reacción aportó 17,4 MeV. La energía es mucho mayor que la observada inicialmente por Alvarez; si se puede incrementar el número de fusiones y se diseñan aceleradores para maximizar la producción de muones negativos se podría conseguir un reactor de fusión a baja temperatura. ¿Podrían otras partículas catalizar una reacción de fusión?

George Zweig, del Instituto de Tecnología de California, ha dedicado mucho tiempo a la catálisis de la fusión por medio de partículas pesadas que lleven una carga eléctrica fraccionaria. El proceso depende de la existencia de tales partículas, que hasta ahora se han mostrado completamente esquivas. Pero si pudieran crearse en un acelerador e introducirse en un gas de moléculas de deuterio, entonces esas partículas podrían provocar la fusión de los núcleos de deuterio. La reacción liberaría entre tres y cuatro millones de electronvolt de energía; la partícula pesada y dotada de carga fraccionaria quedaría libre, como el muon, para catalizar otra reacción de fusión. Zweig estima que un mol de tales partículas, o unos 2,8 decímetros cúbicos de ellas si forman un gas, podrían generar energía a razón de 10^{16} B.t.u. por año. (Una British thermal unit = 1,055 kilojoule.)

Las propuestas para obtener energía no agotan el potencial de beneficios directos que se pueden obtener del trabajo de los últimos 30 años en la física de altas energías. Fijémonos en el mero censo de las partículas: se han descubierto centenares desde 1950, si bien la explotación de sus propiedades no ha hecho más que empezar.

El neutrino, por ejemplo, interacciona tan débilmente con la materia que en un haz de potencia moderada sólo uno entre un millón vería frenado su camino hacia el centro de la Tierra. Si se incrementara la intensidad del haz de neutrinos que atraviese la Tierra, su atenuación en la cara opuesta del planeta podría ser objeto de medida. Posibilidad que ha llevado a proponer la dirección de haces hacia el interior de la Tierra desde varios puntos de la superficie. Procesando la atenuación de esos haces causados por el paso a través de la Tierra, una computadora puede reconstruir la imagen de cualquier región interna del planeta. El procedimiento, en principio, es idéntico al de la tomografía axial computarizada (TAC) de la cabeza, que reconstruye imágenes del cerebro indicando su absorción de rayos X lanzados desde varias direcciones. Los haces de neutrinos también podrían explotarse en la búsqueda de petróleo, yacimientos y depósitos minerales.

Debo subrayar que estos beneficios directos de la investigación fundamental en curso son especulaciones extravagantes. Entra dentro de lo posible que no ocurran nunca. Los he señalado con el exclusivo propósito de sugerir que, si debemos guiarnos por la historia, las aplicaciones futuras de la ciencia pueden superar lo ideado por nuestra imaginación. Para no perdernos en fantasías, vale la pena citar unos cuantos ejemplos de trabajos bastante recientes en ciencias fundamentales, cuyas aplicaciones se han experimentado ya.

Bajo ciertas condiciones, dije antes, algunas partículas exóticas remplazan a los electrones, protones y neutrones en la materia ordinaria. Se convierten, así, en útiles registradores o marcadores físicos. Por ejemplo, un muon cargado positivamente puede sustituir al protón en el núcleo de un átomo de hidrógeno y formar el átomo de muonio; la química del átomo y sus isótopos ha sido estudiada en semiconductores y en aislantes. El uso de muones para detectar distorsiones de una red atómica sólida, la presencia de impurezas o la difusión de un material sobre una superficie o un fluido es algo que la ciencia conoce bien. Se hace difícil no dejarse llevar por la imaginación pensando en la variedad de propiedades nuevas y útiles que pueden encontrarse entre los sistemas compuestos de partículas exóticas. La misma escala del fenómeno sugiere que, si se encuentran las aplicaciones, serán trascendentales.

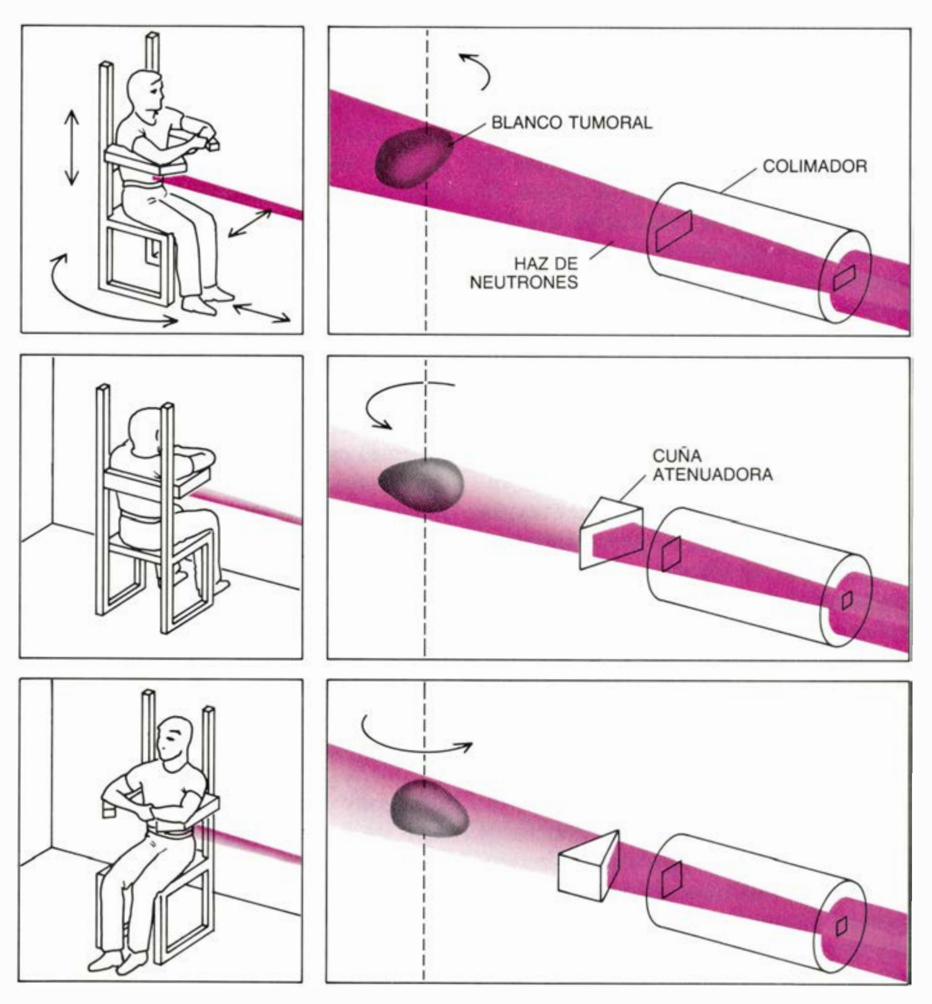
Un segundo beneficio directo surgió del gran interés que hubo en los años 40 por el magnetismo transportado por núcleos atómicos. El protón en rotación actúa como un minúsculo imán; los ejes de giro de un conjunto de protones se autoalinean en presencia de un campo magnético exterior. Si una señal de radio de una frecuencia adecuada se aplica a los protones en rotación puede hacer que los ejes de giro salten rápidamente o inviertan su sentido. La inversión del giro absorbe energía de la señal de radio; midiendo la frecuencia de la energía absorbida pueden determinarse distintas características de la estructura del átomo. La técnica es la base de las imágenes RMN en medicina, un instrumento de diagnóstico no agresivo, que tiene muchas ventajas sobre otras técnicas tales como los rayos X, el TAC o la representación por ultrasonidos. Algunos analistas financieros predicen que la RMN generará pronto ventas anuales de 1000 a 2000 millones de dólares.

Es muy probable que el coste público de la investigación básica pueda justificarse por la mera comparación, peseta a peseta, con el valor de los beneficios indirectos de la ciencia, cambio tecnológico incluido. El costo actual nos lo dice la partida asignada en el presupuesto nacional. (Registrado de una forma un tanto difusa, el dinero destinado a investigación básica alcanzaba los 700 millones de dólares en 1984, cifra ligeramente por debajo del 1 por ciento del Presupuesto Federal. De esta cantidad, sólo 2000 o 3000 millones iban a investigación básica propiamente dicha; el resto se destinaba a aspectos fundamentales de la ciencia aplicada. En España no disponemos todavía

de estadísticas desglosadas de las partidas asignadas a investigación fundamental y a investigación aplicada.) Alvin M. Weinberg, del Instituto para el Análisis de la Energía, en Oak Ridge, y otros han sugerido que el coste de la investigación y el desarrollo industrial debería correr a cargo de sus beneficiarios, pero no el coste de la ciencia fundamental, que tendría que considerarse englobado en los gastos generales del esfuerzo total empeñado en investigación y desarrollo.

El trabajo experimental invertido en la ciencia fundamental resulta en la invención de nuevos instrumentos y técnicas que más tarde se emplean en la creación de bienes y servicios que aumentan el Producto Nacional Bruto. La vuelta a Hacienda, en forma de impuestos recogidos por los nuevos negocios generados, compensa al menos una parte sustancial del coste de la investigación básica. Hay que considerar, además, los nuevos productos en sí mismos que pueden contribuir a la sanidad, a la calidad de vida o al bienestar general y la seguridad. Solamente parte del valor de tales productos es cuantificable. El acelerador que destruye un tumor genera ganancias para el fabricante, para el médico y para el hospital. Es más difícil, aunque estadísticamente posible, adjudicar un valor económico a la prolongación de la vida, siempre que uno se niegue a verla como algo que no tiene precio.

Una segunda clase de beneficio indirecto de la ciencia fundamental es la creación de nuevas oportunidades para la investigación experimental básica en campos muy diversos. Al poco de descifrarse la naturaleza de los rayos X, se ideó la difracción de los mismos para estudiar la estructura de los cristales. De cuya técnica se aprovecharon los biólogos moleculares, hasta el punto de convertirse en poderosa herramienta para aclarar la estructura del ADN. La incesante explotación tecnológica de la primitiva investigación del ADN nos es ahora completamente familiar [véase "Microbiología Industrial" INVESTIGACIÓN Y CIENCIA; noviembre de 1981].



5. TERAPIA DE NEUTRONES: una forma de terapia experimental de radiación que se investiga actualmente en el Fermilab. Los neutrones se originan bombardeando una pieza de berilio con los protones aportados al acelerador principal para el estudio rutinario de las interacciones de partículas elementales. Un paciente con un tumor pancreático se sienta en una silla cuyo eje vertical de rotación puede fijarse en el centro del volumen del tumor en el plano horizontal. La habitación para el tratamiento, que es un ascensor de carga reconvertido, se rebaja hasta que el tumor puede centrarse verticalmente en el eje de un haz fijo de neutrones. El tamaño y la forma del haz de neutrones los controla un colimador, que puede rotar en su collarín, o quitarse y sustituirse a voluntad. La intensidad del haz variará de un punto a otro de su sección eficaz insertando una cuña de espesor variable en la dirección del haz; cuanto más grueso sea el borde más se atenúa el haz. Comienza por exponerse el tumor al haz de neutrones que arranca desde el frente del paciente, luego procede desde el lado derecho y, finalmente, desde el lado izquierdo. La parte gruesa de la cuña está orientada hacia el frente del paciente en las dos exposiciones finales, para procurar una dosis más uniforme de radiación. Se busca siempre maximizar la radiación que alcanza la lesión y minimizar la radiación que afecta a los tejidos colindantes. Un paciente en mejor estado debería haber sido tratado en una posición erecta para reducir la radiación que llega a los intestinos.

Del trabajo teórico de la investigación básica se saca una tercera clase de beneficio indirecto. No poco fruto de este trabajo sirve para otras disciplinas fundamentales, que lo aprovecharán según sus propias necesidades. En este sentido, soluciones encontradas para cierta clase de ecuaciones que aparecen en la teoría electrodébil de las interacciones de las partículas elementales se han aplicado al estudio de la física y química de los polímeros. Métodos matemáticos para evaluar ciertas ecuaciones importantes en el estudio de las partículas elementales se aprovechan para describir la propagación de las olas de densidad en el océano y seguir la probable forma de infiltración de un yacimiento de petróleo en la corteza terrestre. Mucha de la investigación actual sobre computadoras que podrán un día procesar información en paralelo ha venido instada por las necesidades de computarización de la teoría de la cromodinámica cuántica que describe las interacciones de partículas que mediatiza la fuerza fuerte.

El cuarto beneficio indirecto de la investigación básica reside en el rigor que proporciona a los científicos. Unas 130 personas reciben cada año el grado de doctor en física de altas energías, en los Estados Unidos. (Tampoco en esto tiene España datos elaborados.) Casi la mitad de ellos se quedan de momento ejerciendo su especialidad, pero las deserciones son continuas. La tasa de equilibrio se ha situado en cerca del 50 por ciento anual, desde 1974. Por experiencia con los licenciados del laboratorio de Columbia sé que los otros 80 doctorados marcharán a campos muy dispares: investigación industrial y docencia universitaria, laboratorios estatales que no trabajan en física de las altas energías, biofísica, ordenadores, administración, finanzas, gerencia o dirección de sus propios negocios. A este conjunto deberíamos añadir los ingenieros, técnicos y programadores que también se formaron en ciencias básicas para luego tomar otros derroteros.

El flujo de talentos procedentes de la ciencia fundamental ha constituido una fuente importante para amplios proyectos tecnológicos, al menos, desde la Segunda Guerra Mundial.

Para mostrar la profundidad y diversidad del giro tecnológico, recordaré algunos aspectos del trabajo experimental en la física de altas energías que han conducido a descubrir por doquier instrumentos útiles. Subrayaré, una vez más, que la física de altas energías no es caso único. Investigaciones fundamentales en química, biología, astronomía, etcétera, han conducido a aplicaciones de similar variedad e interés.

El acelerador de partículas se construyó para bombear núcleos atómicos con proyectiles energéticos. El resultado de la interacción rinde una gran cantidad de información sobre la estructura de los núcleos usados como blancos. Aplicados a la industria, los aceleradores cumplen misiones con escasa relación con su función original en la física de altas energías. Se emplean ahora para inspección de grandes cubas de acero y tuberías, producción de radioisótopos necesarios en medicina, esterilización de alimentos, desinfección de aguas residuales que van a ser reducidas como fertilizantes y tratamiento directo de tumores. Los aceleradores se utilizaron ampliamente para recoger los datos necesarios para el diseño de los reactores de fisión y fusión. Un plan para generar energía de la fusión nuclear requiere haces acelerados de iones que deberían comprimir y encender pequeños gránulos de combustible.

Las técnicas desarrolladas para acelerar haces de electrones se han aplicado para crear pulsos altamente energéticos de iones ligeros. Tales pulsos suministran billones de watt de energía sobre una pequeña superficie durante un corto espacio de tiempo; también podrían emplearse en el programa energético de fusión para confinar la reacción intensamente caliente de fusión. Los aceleradores son usados para implantar iones en materiales semiconductores durante la fabricación de circuitos integrados, para añadir cantidades pequeñísimas de metal raro a una mezcla en la fabricación de aleaciones, para reconocer los depósitos de hidrocarburo en la roca que rodea la cavidad de un pozo y para transformar ciertos plásticos, como los usados en la fabricación de botellas para niños y envolturas retráctiles, en materiales que no se derriten en agua hirviendo.

Los aceleradores de electrones también producen radiación sincrotrónica, la radiación electromagnética generada por la desviación de partículas cargadas en un campo magnético. En la región de rayos X y en la ultravioleta del espectro, su intensidad puede elevarse hasta un orden de magnitud cinco veces superior al de la radiación generada por fuentes convencionales. Su alta intensidad y su amplio espectro hacen que las radiaciones de sincrotrón sean aprovechables en múltiples aplicaciones. Por ejemplo, en la fabricación de circuitos integrados, la radiación de sincrotrón permite centuplicar, o incluso multiplicar por mil, la densidad del circuito en cada pastilla producida.

La radiación de sincrotrón extiende sus posibilidades al campo médico y biológico. En el diagnóstico de enfermedades cardiovasculares y en el estudio de la estructura y función de los vasos, médicos e investigadores la encuentran útil para poder contemplar la coronaria y otras arterias pequeñas. La alta intensidad de la radiación de sincrotrón facilita que los clínicos examinen hasta las estructuras más pequeñas, sin riesgo del paciente.

Para hacer justicia plena al estímulo que el acelerador ha proporcionado a la economía, hay que citar también cambios provenientes de otros cambios. El desarrollo del acelerador ha conducido a avances en la generación de ultravacíos y de señales de alta energía en radiofrecuencias, en haces ópticos de gran precisión, en controles electrónicos y en la comprensión de las propiedades de materiales sometidos a bombardeos energéticos. El efecto neto de estas aplicaciones ha sido la puesta en marcha de una actividad económica valorada en muchos miles de millones de dólares por año.

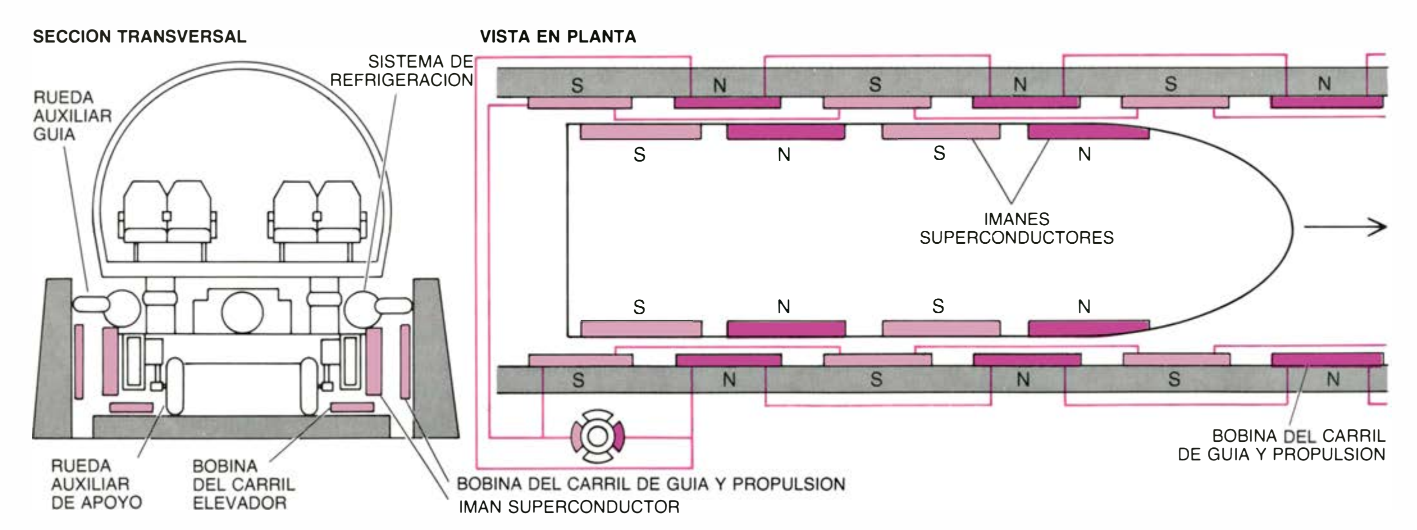
Una tarea importante del trabajo fundamental en física experimental es la detección de los productos de las colisiones de partículas elementales, una vez generadas. Detectores tales como el contador Geiger, cámaras de iones y contadores de centelleo acoplados a válvulas fotomultiplicadoras son elementos familiares en muchas industrias que emplean aceleradores. La fabricación de detectores de rayos gamma, construidos de cristales de ioduro sódico activados con talio, forma parte de un negocio con ventas de 50 millones de dólares por año.

Circuitos digitales cuya función original se ceñía a registrar las trayectorias de partículas desempeñaron un papel único en el desarrollo del computador; la ingente cantidad de datos producida por la actual generación de aceleradores continúa estimulando el trabajo sobre nuevas técnicas para el proceso de datos y sobre la arquitectura y programación de nuevos ordenadores. El procesamiento de datos a razón de 10.000 millones de bytes por segundo es ahora algo normal en la física de altas energías; se esperan relaciones de varios órdenes de magnitud superior. Las necesidades de computarización de los físicos de altas energías han servido de verdadero resorte y apoyo para la proliferación de pequeñas e innovadoras compañías de ordenadores. Esa proliferación ha conducido, a su vez, a una industria altamente competitiva con notables beneficios para el consumidor.

La detección de partículas trajo también soluciones innovadoras de problemas de alcance general. Verbigracia, para determinar qué acontecimientos nucleares son dignos de un examen más detallado, dentro de los varios millones anuales, se idearon sistemas automáticos que reconocían ciertos tipos de señales del detector. Técnicas de reconocimiento de tipos y proceso de señales que adoptarían astrónomos y biólogos.

Alguno de los trabajos más recientes en la física de altas energías deberán incrementar la precisión y disponibilidad de aparatos que exploten los efectos de la superconductividad. Los físicos construyeron los primeros grandes imanes superconductores para que intervinieran en la detección de partículas elementales. Más recientemente, la tecnología se ha ampliado a la fabricación de imanes para usarlos en aceleradores, lo que constituye un empeño mucho más difícil. El campo magnético ha de ser susceptible de cambio y mantenimiento con gran precisión a través del ciclo de aceleración. Un anillo superconductor de imanes de unos seis kilómetros y medio de circunferencia acaba de instalarse en el Fermilab; la escala de ubicación, incluidas las instalaciones criogénicas requeridas para enfriar 1000 imanes hasta unos cuatro grados C por encima del cero absoluto, no tiene precedente. Esto nos demuestra la posibilidad de construir un sistema de refrigeración a gran escala, un sistema de tuberías y los controles computarizados exigidos para operaciones de superconducción.

Instalaciones de superconducción más amplias todavía podrían estimular a la industria a fabricar componentes de superconducción, y rebajar por tanto el coste por unidad, creando puestos de trabajo y acercando el ingente potencial de beneficios de la superconductividad hasta su viabilidad práctica. Piénsese, por ejemplo, que las líneas de energía de superconducción



6. IMANES SUPERCONDUCTORES en un tren de pruebas japonés. Inducen un fuerte campo magnético de la misma polaridad en las bobinas empotradas en el fondo del carril. La repulsión entre imanes superconductores y los del carril elevan el tren, eliminando así el rozamiento entre la rueda y la vía que es la causante de mucha pérdida de energía en un tren convencional (*izquierda*). El tren es impulsado también magnéticamente; en efecto, el sistema de propulsión es un motor eléctrico sincronizado y acoplado en línea. Las bobinas se montan a ambos lados del carril y se conectan a una fuente de energía eléctrica, de suerte que su polaridad magnética alterne entre el norte y el sur a lo largo de las guías (*derecha*). La polaridad de los imanes superconductores del tren no cambia. Cada imán superconductor es impulsado hacia adelante por repulsión de la bobina lateral más cercana de igual polaridad y simultáneamente es atraída hacia adelante por la atracción de la bobina siguiente de distinta polaridad. La polaridad de las bobinas de un mismo lado se invierten y así el tren recibe otro impulso hacia adelante. El tren mostrado esquemáticamente en la ilustración es el MLU 001, construido al 60 por ciento de su escala real y experimentado a velocidades superiores a los 30 kilómetros por hora en la pista de pruebas Miyazaki. La aplicación de la superconductividad en una escala tan amplia como un ferrocarril requiere un gran sistema de refrigeración y de bombeo para el helio-líquido refrigerante que debe mantenerse a 4,2 grados Celsius sobre el cero absoluto. Con mucho, el más amplio sistema de refrigeración por helio-líquido que se ha preparado en el mundo es el del Fermilab, que enfría 1000 imanes superconductores instalados en un anillo de 6,5 km, que controla y enfoca haces de partículas.

transportarían energía eléctrica sin pérdidas. Se podría entonces contemplar una separación aún mayor entre la incómoda central eléctrica y el consumidor. Se ha instalado ya imanes superconductores en trenes experimentales de pasajeros en Japón; el tren flota sobre imanes de la misma polaridad en la capa de balasto.

Pero no podemos afirmar, a modo de consecuencia, que quede clara la relación que existe entre los beneficios de la cultura, directos e indirectos, y sus costes. Lo que sí parece verdad es que esa relación no es estrictamente proporcional: si el apoyo económico a la investigación cae por debajo de cierto nivel crítico, la ciencia fundamental descenderá en picado. Se reduciría el número de científicos que podrían permanecer activos en su trabajo en tales condiciones. En muchas subdisciplinas, la necesaria discusión para guardar el avance fructífero se debilitaría por falta de participantes, competentes e interesados.

A pesar de ignorar la naturaleza exacta de la respuesta de la ciencia a los distintos niveles del apoyo público podemos asentar unos criterios que midan la idoneidad de las ayudas. Un indicador comprobable es el de la relación en que los jóvenes investigadores comienzan a destacar. En las ciencias físicas la proporción ha caído desde la cota máxima de 4500 nuevos doctorados graduados en 1971, hasta la "meseta" en que nos encontramos hoy, en torno a los 3400. En las ciencias de la vida el número absoluto de nuevos doctorados aumenta, pero la tasa de crecimiento ha descendido casi hasta cero. El quebranto parece darse en matemáticas. Aun cuando las matemáticas abarcan también las ciencias de la computación, el número de nuevos doctorados está bajando de una forma drástica. Tal bajón de los recursos de las ciencias básicas constituye un trágico error. Las grandes intuiciones en ciencia y tecnología débense, frecuentemente, a genios aislados; la pérdida de uno solo de ellos, capaz de encontrar una cura para el cáncer, por poner un ejemplo, resultaría abrumadoramente cara.

¿Qué hacer? Me he limitado a esbozar un somero análisis que pueda servir de pauta para un estudio detenido de los efectos económicos y culturales de la investigación básica. Un estudio definitivo podría abordar tres temas principales. Primero, tendría que identificar los campos de la ciencia que están más alejados de las aplicaciones y merecen ser llamados fundamentales; obviamente habrá zonas grises. Segundo, deberían rastrearse los efectos del trabajo realizado y del trabajo en curso en investigación básica, disciplina por disciplina. Tendría que ponerse sobre la mesa la conexión entre laboratorio e industria, así como dar cuenta del aprovechamiento industrial en razón de las posibilidades del trabajo de laboratorio. Finalmente, el estudio debería estimar la contribución hecha por investigación básica a la educación de las personas involucradas en la tecnología y ciencias aplicadas. Una de las cuestiones más sutiles aquí es la referente a la calidad: ¿Son las mentes mejor dotadas las ocupadas en la investigación básica?

La tesis de este artículo es que un estudio tal manifestaría paladinamente que la investigación básica se autofinancia, que devuelve a la sociedad un enriquecimiento cultural y recursos continuos para elevar la calidad de vida. Más aún, dada la creciente atención otorgada a nuestros recursos naturales y al medio ambiente que el futuro parece depararnos, una adecuada base de conocimiento fundamental sobre el que construir una respuesta tecnológica se convierte en una cuestión de supervivencia. Podría suponerse, por todas estas razones, que la idea de la ciencia fundamental como un acto de confianza de la nación es, a la vez, cierta y beneficiosa. La meta consiste entonces en reproducir parte de las oportunidades que tuvieron los jóvenes investigadores en ese período, extraordinariamente fecundo, de 1955 a 1968. Si esta meta se alcanza, el público y los políticos que están a su servicio ganarán.



El firmamento en infrarrojo

Un telescopio en órbita, enfriado por helio líquido, ha tomado imágenes panorámicas en infrarrojo del cielo, registrando el resplandor de la materia fría del sistema solar, de la galaxia y del universo en general

Harm J. Habing y Gerry Neugebauer

Para los astrónomos, la región infrarroja del espectro electromagnético constituye una fuente de fascinación y frustración a un tiempo. Muchos objetos astronómicos –principalmente los integrados por materia fría y sólida– radian la mayor parte de su energía en longitudes de onda del infrarrojo. Además, ciertos sucesos de especial interés –tales como el nacimiento de estrellas y la condensación de sistemas planetarios– se contemplan de manera óptima a través del infrarrojo. Ahora bien, en la superficie de la Tierra, la atmósfera impide, casi por entero, el paso de la radiación infrarroja. Añádase que la construcción de un instrumento astronómico sensible a las longitudes de onda del infrarrojo supone un formidable desafío técnico. Ello explica que, mucho después de la exploración del cielo en las longitudes de onda de la luz visible y de las radioondas, e incluso tras rastrearlo en el ultravioleta, rayos X y rayos gamma, permaneciera una gran extensión del mismo sin cartografiarse en el infrarrojo. Solamente en las longitudes de onda más cortas del infrarrojo se había explorado el cielo con alta sensibilidad.

Con instrumentos a bordo del Satélite Astronómico Infrarrojo (*IRAS*, de *Infrared Astronomical Satellite*), se ha realizado ya una exploración del cielo exhaustiva, cubriendo un amplio dominio de longitudes de onda en el infrarrojo. El satélite fue lanzado en un programa conjunto de la Agencia Holandesa de Programas Aeroespaciales (NIVR), la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio de los Estados Unidos (NASA) y el Consejo de Investigación en Ciencia e Ingeniería del Reino Unido (SERC). Operó durante la mayor parte del año 1983, registrando imágenes del 98 por ciento de la esfera celeste. La misión ha recogido una rica cosecha: con los datos enviados por el satélite, se han compilado mapas del brillo del cielo en cuatro bandas de longitudes de onda infrarrojas y se han catalogado unas 250.000 fuentes discretas de emisión infrarroja. La magnitud de esta cifra merece destacarse: en toda la historia de la astronomía anterior al *IRAS* se habían catalogado sólo unas 500.000 fuentes.

Como instrumento de exploración, el *IRAS* debía dar una visión de conjunto del cielo en el infrarrojo e identificar objetos que mereciesen ulterior investigación. Ambas finalidades se han cumplido. Dentro del sistema solar, el satélite detectó nuevos cometas y un par de tenues bandas de polvo por encima y debajo del cinturón de asteroides. Halló una extensa banda de materia sólida en órbita alrededor de una estrella próxima, banda que quizá represente un estado primitivo de la formación de un sistema planetario. En otros lugares se observaron estrellas recién nacidas, envueltas todavía en el velo de gas y polvo del que se habían condensado. El satélite proporcionó una visión clara y panorámica del núcleo de la Vía Láctea. De las galaxias detectadas por el *IRAS*, algunas brillan 50 veces más en longitudes de onda del infrarrojo que en la banda visible.

Las observaciones del *IRAS* no eran las primeras que se hacían del cielo infrarrojo. Desde el suelo se pueden acometer también, en estrechas "ventanas", en el espectro donde las longitudes de onda de la radiación en el infrarrojo próximo, más cortas que las exploradas por el *IRAS*, penetran a través de la atmósfera. Para estudios en el infrarrojo lejano, se han transportado los telescopios fuera de la atmósfera en globos, cohetes y aviones de gran altitud; pero resulta difícil realizar con estas técnicas una exploración sensible del cielo entero en el infrarrojo. El valor de la exploración reside, sobre todo, en su imparcialidad; en un programa de observación circunscrito a determinados objetos, los resultados pueden estar sesgados por el proceso de selección. Un satélite observatorio es una plataforma ideal para una exploración.

La opacidad de la atmósfera no es el único problema con el que se ha de enfrentar el astrónomo de infrarrojo. La radiación infrarroja es emitida copiosamente por la materia a temperaturas terrestres ordinarias; por ejemplo, el tubo y los componentes ópticos del telescopio a la temperatura de la habitación resplandecen en el infrarrojo. El resplandor tiende a enmascarar la señal infrarroja de interés. En el vacío aislante del espacio, se resolvió este problema enfriando el telescopio con helio líquido. El *IRAS* tenía el mayor sistema criogénico, con mucho, de los colocados en órbita terrestre. La necesidad de conservar la provisión de helio resultó determinante en el diseño del telescopio y en el programa de observación. Y

1. VISTA DEL CIELO EN INFRARROJO: recoge una zona de 22 por 30 grados en las constelaciones de Tauro y Perseo. Se reconstruyó a partir de los datos recogidos por el *Satélite Astronómico Infrarrojo* (*IRAS*, por sus iniciales en inglés). La imagen combina medidas del flujo de radiación en tres bandas de longitudes infrarrojas: las emisiones de 12 micrometros se representan en azul, las de 60 micrometros en verde y las de 100 micrometros en rojo. Así, los colores indican la temperatura aproximada de la materia emisora: las regiones azules son las más calientes y las rojas las más frías. La imagen registra el flujo total en "celdas" cuadradas de dos minutos de arco de lado. Las dos regiones resplandecientes mayores son las nebulosas NGC 1499 (en la parte superior de la imagen) e IC 348. Se trata de aglomeraciones de gas y polvo calentadas por estrellas inmersas en su interior. El objeto blanco, en forma de coma, situado bajo IC 348, es la emisión del polvo que rodea las Pléyades, agrupación de estrellas jóvenes y calientes. A la izquierda de las Pléyades, cerca del borde de la imagen, surge TMC 1, una región de formación de estrellas; en su interior se aprecia un conjunto semicircular de cuatro estrellas recién nacidas, envueltas en el polvo del que se condensaron. Alfa del Toro, la estrella más brillante de la región a las longitudes de onda del visible, aparece como un débil punto azul a unos nueve centímetros por debajo de TMC 1.

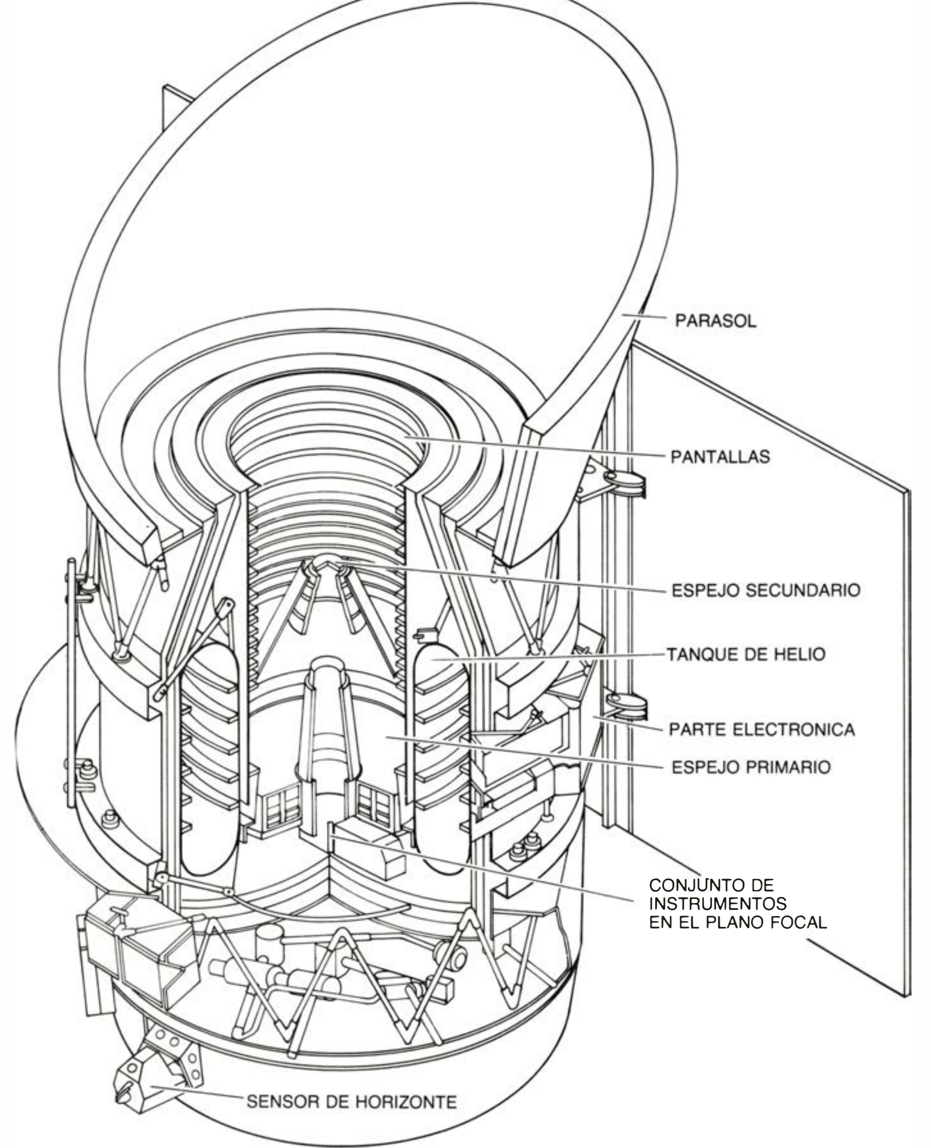
fue la evaporación del líquido refrigerante lo que acabó con la misión.

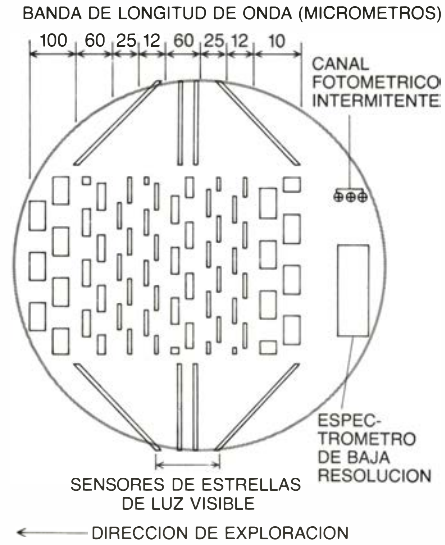
El proyecto del *IRAS* comenzó en 1974. En él trabajaban la NASA y la NIVR, cada uno por su lado. Se decidió aunar ambos programas; poco después se sumaba el SERC al esfuerzo común. El telescopio, los detectores principales de exploración y el sistema criogénico fueron construidos, en los Estados Unidos, por la NASA. El NIVR holandés se encargó de las restantes partes del vehículo espacial, entre ellas los paneles solares para la alimentación eléctrica, los ordenadores de a bordo y los sistemas de control y orientación del telescopio. El SERC habilitó una estación terrestre en el Rutherford Appleton Laboratory, en Chilton, Inglaterra, para gobernar el satélite. La dirección de las actividades del proyecto, en los Estados Unidos, estaba en el Laboratorio de Propulsión a Chorro del Instituto de Tecnología de California, donde se está realizando el análisis final de la mayoría de los datos.

El telescopio tenía un camino óptico "doblado": la radiación incidía sobre un espejo primario de 57 centímetros, tras lo cual un pequeño espejo secundario la dirigía a través de una abertura en el centro del primario. En el plano focal, la radiación se focalizaba sobre tres instrumentos que incorporaban detectores de semiconductor sensibles a la radiación en longitudes de onda del infrarrojo. El telescopio estaba alojado en un recipiente aislado que en el momento del lanzamiento contenía 475 litros de helio líquido. El refrigerante mantenía el tubo del telescopio y sus espejos a unos 10 grados Kelvin (grados Celsius sobre el cero absoluto). Los detectores, por su parte, ni siquiera llegaban a los tres; estaban en torno a los dos grados Kelvin. El refrigerante se mantenía a esta temperatura, muy por debajo de su punto de ebullición, facilitando su evaporación.

Los detectores eran dispositivos fotoconductores provistos de filtros que respondieran a bandas específicas del infrarrojo. Gozaban de una extraordinaria sensibilidad: el telescopio detectaba un gránulo de polvo a dos o tres kilómetros de distancia. El instrumento principal de exploración lo formaba el conjunto de 62 detectores que cubrían la porción más importante del espectro infrarrojo, desde 8 a 120 micrometros, en cuatro bandas centradas en longitudes de 12, 25, 60 y 100 micrometros. (La parte visible del espectro se extiende hasta los 0,7 micrometros; las ondas de radio comienzan hacia los 1000 micrometros.) Además del conjunto principal de detectores, había otros dos instrumentos montados en el plano focal: un espectrómetro para registrar el espectro infrarrojo de fuentes brillantes y un fotómetro para medir fuentes preseleccionadas, con resolución espacial mayor de la que podía proporcionar el conjunto de exploración.

A cada elemento del conjunto del detector principal se le hacía explorar





2. EL SATELITE ASTRONOMICO INFRARROJO llevaba un telescopio con un espejo primario de 57 centímetros de diámetro y un conjunto de detectores electrónicos sensibles a la radiación infrarroja. Para eliminar la propia emisión infrarroja del instrumento, el telescopio permanecía enfriado con helio líquido, que mantenía el tubo y el sistema óptico a unos 10 grados Kelvin y los detectores a dos grados. Los principales detectores de exploración montados en el plano focal del telescopio eran dispositivos de silicio y germanio sensibles a cuatro bandas de longitudes de onda del infrarrojo. Los detectores se disponían en filas escalonadas de modo que, cuando el telescopio exploraba el cielo, la imagen de una fuente cruzase al menos dos detectores en cada banda. El canal fotométrico intermitente y el espectrómetro de baja resolución realizaban medidas adicionales. (Resumen esquemático de Ian Worpole.)

una banda de cielo de unos cinco minutos de arco de anchura; producía una señal proporcional al flujo total de radiación infrarroja que recibía en su banda. El tratamiento mediante ordenador, realizado en tierra, extraía fuentes discretas de la corriente continua de datos y combinaba las múltiples observaciones de una fuente única. Por la propia naturaleza del tratamiento, las fuentes discretas eran "puntuales"; dada la resolución angular de los sensores del *IRAS*, esto significa menor que algunos minutos de arco.

La órbita del satélite, a unos 900 kilómetros de altitud, era casi polar. El plano de la órbita giraba alrededor de un grado de arco por día, concordando con el movimiento orbital de la Tierra alrededor del Sol. De esta manera, el vehículo espacial se mantenía constantemente sobre el "terminador" terrestre, o límite entre el día y la noche; apuntaba, pues, a unos 90 grados de distancia angular del Sol.

La gran sensibilidad de los elementos del detector costó lo suyo: el polvo y los residuos cercanos al satélite, así como el paso de los rayos cósmicos y otras partículas de gran energía por el detector, generaban señales espurias. Las señales astronómicas se separaban de este ruido de fondo imponiendo la condición de que toda fuente reconocida tenía que confirmarse por observaciones repetidas en varias escalas de tiempo. De una fuente que había sido vista por dos elementos del detector con intervalo de algunos segundos, se decía que estaba confirmada en segundos. De una fuente observada en dos órbitas consecutivas se decía, entonces, que estaba confirmada en horas. Ulteriores reexploraciones de la misma zona del cielo posibilitaron confirmaciones en semanas o meses. Por estos medios, la exploración adquirió plena seguridad y exhaustividad. Salvo en regiones del cielo donde la densidad de fuentes produce confusión, los autores calcularon que el 99,8 por ciento de las fuentes catalogadas eran reales; no se pasarían por alto más del 2 por ciento de las fuentes reales de suficiente brillo para su detección.

El *IRAS* fue lanzado el 25 de enero de 1983, desde la Base Vandenberg de la Fuerza Aérea, en California. Tras algunos días de ensayos preliminares, se quitó la tapa de la abertura y comenzaron las observaciones. Dos veces al día se transmitían a la Tierra unos 700 millones de bits de datos de imágenes. Alrededor del 60 por ciento del tiempo de observación se dedicó a la exploración; el resto se empleó en observaciones puntuales de blancos elegidos. En agosto se había obtenido una cobertura casi completa del cielo; comenzó otra ronda de exploraciones. El día 22 de noviembre, cuando se acabó la provisión de helio y se paró el telescopio, el *IRAS* había cubierto el 95 por ciento del cielo con al menos exploraciones confirmadas en dos horas.

Los descubrimientos de la misión *IRAS* inciden en todos los campos de interés astronómico: el sistema solar, las estrellas próximas y el espacio interestelar, otras regiones de la Vía Láctea, otras galaxias y por último, quasars y objetos similares extremadamente distantes. Los datos proporcionados por el satélite dan la primera panorámica completa del cielo en el infrarrojo lejano.

La apariencia del cielo depende en cierto grado del tamaño espacial o angular de lo que se mira y, por supuesto, de las longitudes de onda en que se realiza la observación. En las longitudes de onda más cortas del *IRAS*, los objetos brillantes y puntuales son estrellas calientes; se está contemplando la porción de onda larga del espectro continuo de las estrellas, que tiene su máximo en el visible. Una densa concentración de estrellas marca el disco de la galaxia de la Vía Láctea. A longitudes de onda más largas, las fuentes puntuales fuera del plano de la Vía Láctea son, esencialmente, todas las galaxias externas, cuyas emisiones incluyen una intensa componente con una temperatura efectiva de 20 a 60 grados Kelvin. Como podría esperarse, las galaxias detectadas se distribuyen por el espacio de un modo bastante uniforme. La distribución de estrellas y de galaxias se ofrece en la figura 4.

Las observaciones de estrellas del *IRAS* han proporcionado también una nueva manera de considerar la estructura y la forma general de nuestra galaxia. Extractando del catálogo de fuentes puntuales las que satisfacen criterios específicos de selección, podemos tomar muestras de diferentes constituyentes de la galaxia. En particular, se puede escoger una clase de brillantes fuentes infrarrojas que radian intensamente a 12 y 25 micrometros y mucho menos a otras longitudes de onda. Se trata, quizá, de estrellas calientes (con temperaturas de algunos miles de grados) rodeadas de materia más fría (a unos cientos de grados).

La distribución de esas fuentes se representa en la figura 5. Muestra una configuración nítida, en la que un núcleo galáctico se superpone a una delgada cuña, el disco de la galaxia seguramente. En otras galaxias se perciben abultamientos similares, pero ha sido imposible ver la forma global de la Vía Láctea desde nuestra posición dentro del disco.

Si en vez de atender a las fuentes puntuales, nos detenemos en la emisión de configuraciones extensas, se aprecia una representación distinta del cielo. A longitudes de onda cortas (12 y 25 micrometros), la principal contribución a la emisión infrarroja de fondo procede del polvo zodiacal, un componente del sistema solar. El polvo se concentra en el plano zodiacal o eclíptico (plano en que está la órbita del planeta) y, en las imágenes del *IRAS*, brilla intensamente. La estructura detallada de la emisión zodiacal reviste su interés. La emisión presenta su máxima densidad en el plano eclíptico, como era de esperar, pero hay también dos bandas fuera del mismo a unos nueve grados por encima y por debajo.

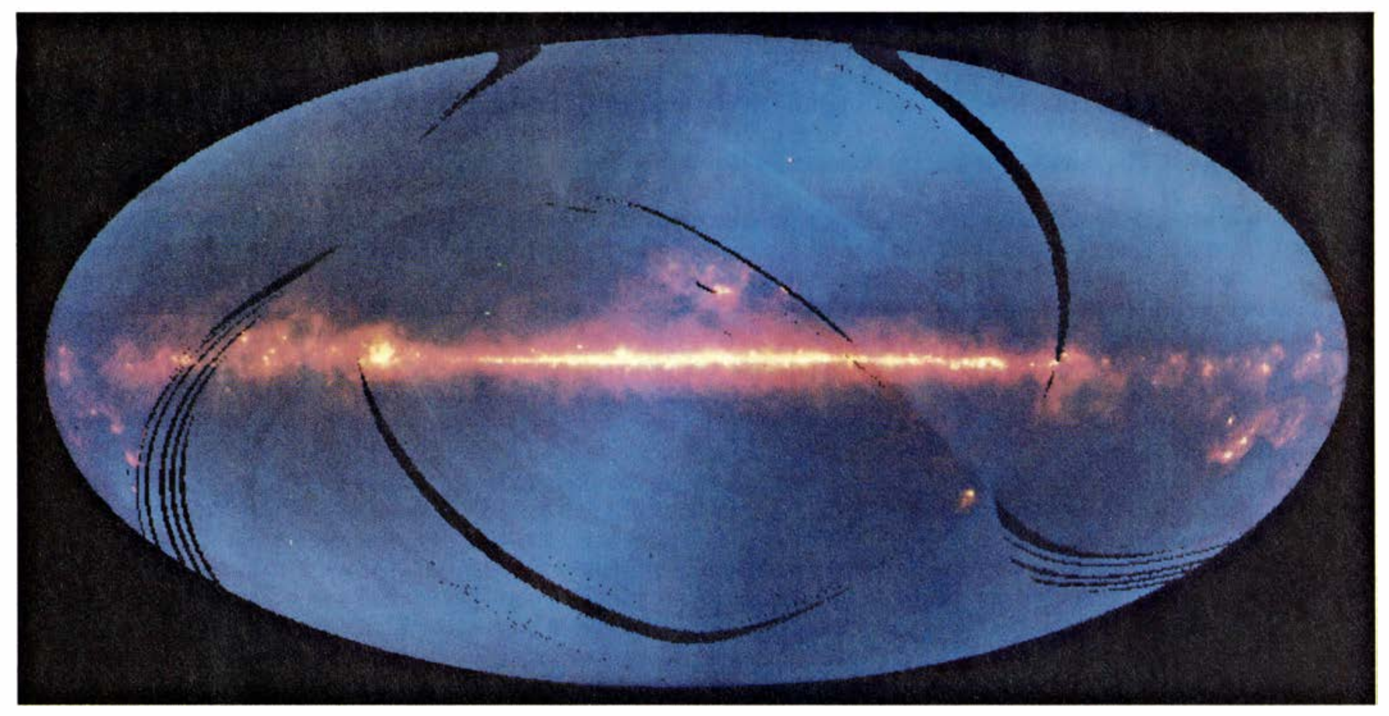
La materia que se encuentra en el plano eclíptico puede deberse al limado de los asteroides en sus colisiones múltiples; más difíciles de explicar son los dos halos que flanquean el plano. El hecho de que la materia, en los anillos, parezca describir órbitas alrededor de un punto bien por encima, o por debajo, de los polos solares es, ciertamente, una ilusión; las partículas se disponen en órbitas que cruzan la eclíptica a un ángulo de 9 grados; las partículas pasan parte de su tiempo en cada banda. Se ven dos anillos paralelos, y no un cilindro continuo, porque cada partícula gasta más tiempo fuera de la eclíptica que en su vecindad. La pregunta a resolver es: ¿qué puede haber originado una población definida de partículas de polvo con un ángulo de inclinación orbital tan grande? ¿Quizá la desintegración de un cometa al colisionar con un asteroide?

Un análisis de la emisión en las cuatro bandas de longitud de onda revela algunas características de las partículas de polvo. Poseerán cierto tamaño (de un diámetro, tal vez, de 30 micrometros) y serán oscuras (reflejando del 10 al 20 por ciento de la radiación que incide sobre las mismas). Considerando su proximidad al Sol, están relativamente frías, quizá a unos 275 grados Kelvin, una temperatura cercana a la del interior de los edificios. Este hecho sugiere, a su vez, que pudieran estar en gran parte constituidas por silicatos, que radian en longitudes de onda del infrarrojo de manera más eficaz que otras materias posibles, permanecien-

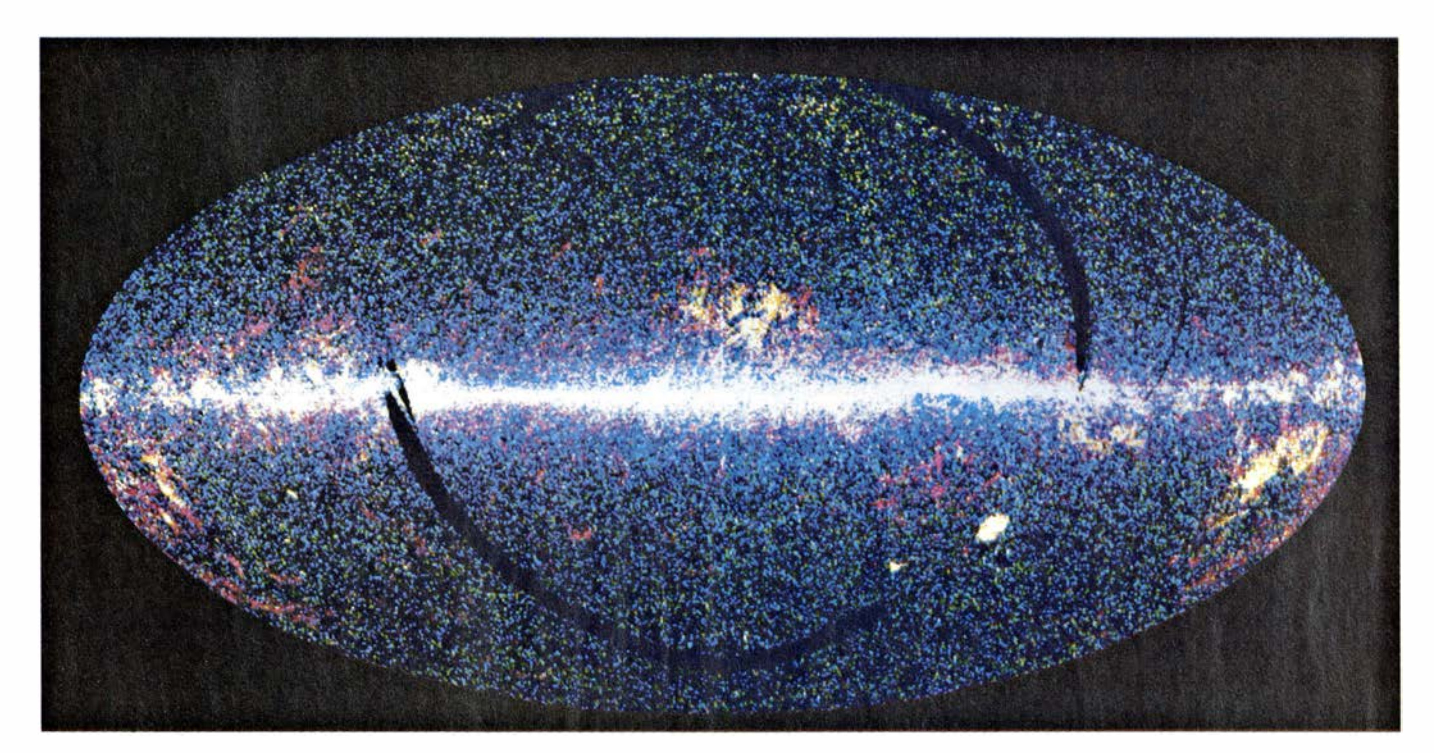
do, por tanto, más fríos. Los silicatos son el componente principal de la mayoría de los cuerpos rocosos del sistema solar.

En las bandas de longitud de onda más larga, la radiación infrarroja de fondo tiene otras componentes. Vale la pena destacar las configuraciones observadas en la radiación de fondo a 100 micrometros. Cuando los datos de esta banda se filtran espacialmente para poner de manifiesto características de tamaños comprendidos entre medio y 10 grados, se nos evidencia una esfera celeste cubierta de tenues nubes, los llamados cirros infrarrojos.

Queda mucho por saber de la naturaleza y situación de los cirros infrarrojos. Algunos de ellos quizá formen parte del sistema solar, pero la imposibilidad, en un análisis provisional, de detectar ningún efecto de triangulación, indica que las nubes distan al menos 1000 unidades astronómicas



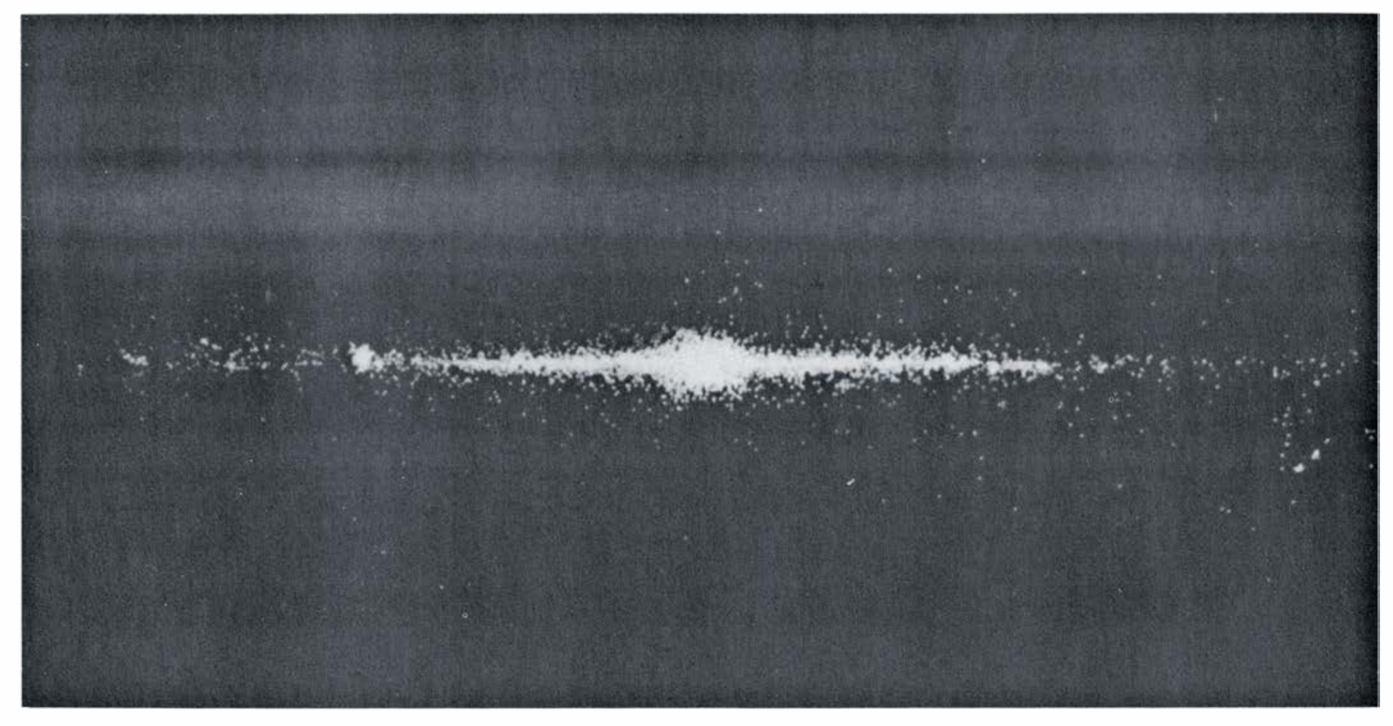
3. **EMISION INFRARROJA TOTAL en las bandas del *IRAS*, en celdas de dos minutos de arco; dicha emisión está dominada por la radiación procedente del plano galáctico de la Vía Láctea y del plano eclíptico del sistema solar. En esta imagen (y en las tres subsiguientes), el firmamento se ve en una proyección que orienta el plano de la galaxia horizontalmente. El plano eclíptico es la banda azul, débil y sinuosa. Las emisiones en las bandas de 12, 60 y 100 micrometros se muestran en azul, verde y rojo, respectivamente. Las zonas sin detalles representan partes del cielo no cubiertas en la exploración.**



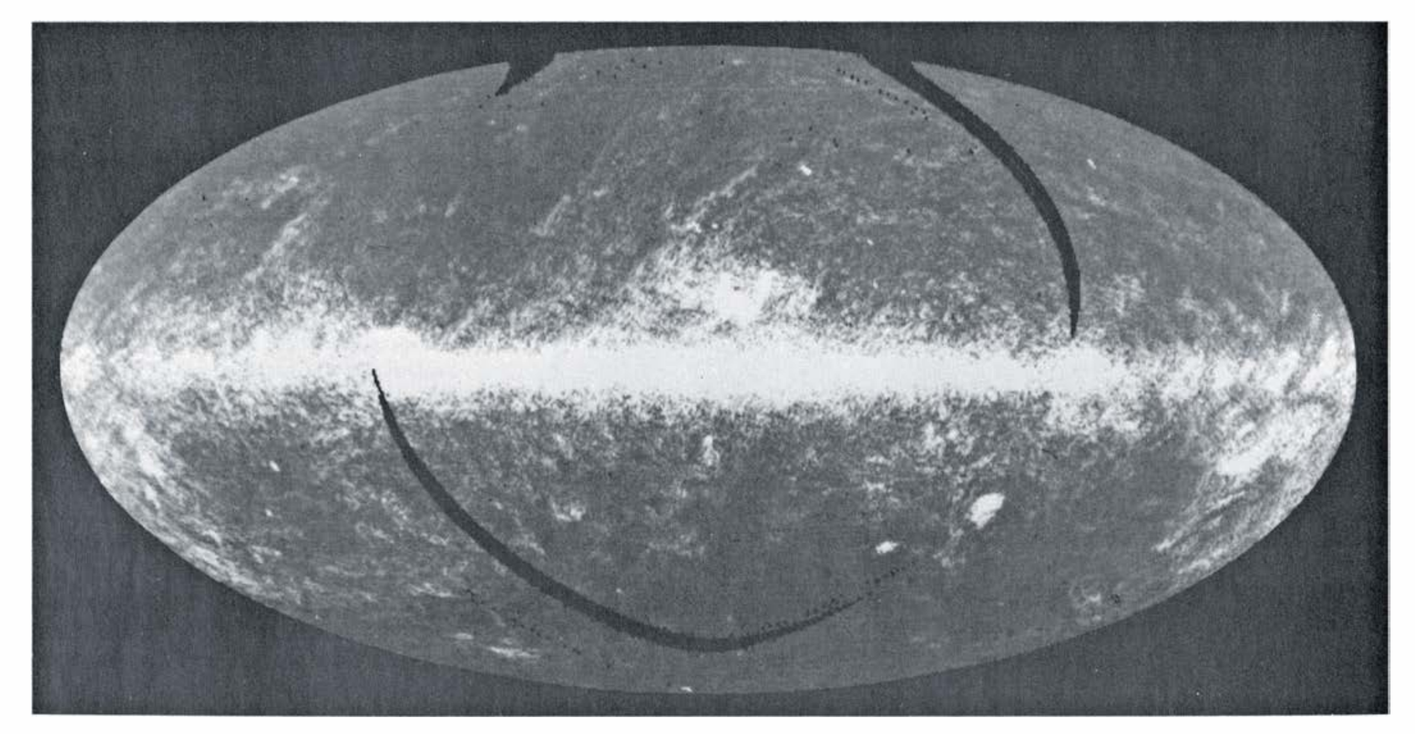
4. **ESTRELLAS Y GALAXIAS dominan en un mapa del cielo preparado con el catálogo de fuentes discretas del *IRAS*. La mayoría de las estrellas, que están muy calientes, se detectaron en la más corta de las longitudes de onda a las que el *IRAS* era sensible, es decir, a 12 micrometros. Se representan aquí como puntos azules. Las galaxias externas suelen tener su señal más intensa a longitudes de onda mayores; aquí se han detectado por su emisión a 60 micrometros y se representan como puntos verdes. Lejos del plano galáctico, la distribución de galaxias en el cielo viene a mostrarse bastante uniforme.**

(1000 veces la distancia de la Tierra al Sol, o sea, 25 veces el radio orbital de Plutón); debería ser posible extender el límite hasta 5000 unidades astronómicas. Las nubes podrían quedar a unas 50.000, o incluso 100.000, unidades astronómicas y permanecer todavía ligadas gravitatoriamente al Sol. A esa distancia, cabría asociarlas con la nube de Oort, un núcleo de materia que se supone constituye la fuente de la mayoría de los cometas.

Los cirros infrarrojos, en su mayor parte, están probablemente en el medio interestelar, fuera del sistema solar aunque dentro de la inmediata vecindad del Sol. Algunas de las configuraciones de cirros coinciden con nubes de hidrógeno gaseoso observadas a longitudes de radioondas; se sabe que las nubes de hidrógeno son interestelares, distantes cientos de años-luz o más (equivalente a varios millones de unidades astronómicas).



5. FORMA GENERAL DE LA VIA LACTEA según se ofrece en este mapa del cielo, que muestra la distribución de una pequeña subpoblación de estrellas. El mapa se generó seleccionando sólo las fuentes discretas cuyas emisiones a 12 y 25 micrometros indican una temperatura de unos 400 grados Kelvin. En su mayor parte, se trata de estrellas envueltas en polvo que radian el grueso de su energía en el infrarrojo. El plano galáctico está definido por la distribución de las estrellas; hay también un abultamiento, cerca del centro de nuestra Vía Láctea, que no se distingue en las longitudes de onda del visible.



6. SE LLAMAN CIRROS INFRARROJOS los copos o briznas de polvo frío que, en las observaciones del satélite astronómico *IRAS*, aparecieron dispersos por todo el cielo. La imagen se ha construido a partir de datos recibidos en la banda de 100 micrometros, filtrados para realzar los distintos rasgos con un tamaño angular de entre medio y 10 grados. Algunos cirros infrarrojos podrían ser parte del sistema solar externo, pero la mayoría yacen, probablemente, en el espacio interestelar cercano. Pueden ser escapes de galaxias: humo galáctico; se los supone constituidos de finas partículas de grafito.

Si la interpretación interestelar de las nubes es correcta, estarán constituidas por gas y polvo expulsados por estrellas moribundas y, probablemente, barridos por los residuos de una supernova en expansión. A partir de la emisión a 60 y 100 micrometros, se puede calcular la temperatura media de la nube: yace entre 25 y 50 grados. Se trata de un valor alto para una materia a tal distancia de cualquier estrella, lo que impone limitaciones sobre los posibles componentes de los granos de polvo. Es probable que una parte importante de componentes de las nubes sean partículas muy finas de carbono, en forma de grafito. Las partículas de grafito radian menos eficazmente que las de silicato del polvo y, por tanto, permanecen más calientes.

Las primeras observaciones sorprendentes obtenidas por el *IRAS* se referían a objetos que se mueven a gran velocidad por el sistema solar: los cometas. Los datos procedentes del satélite se sometieron a un análisis preliminar de ordenador en el laboratorio Rutherford Appleton para detectar fuentes que se habían movido entre observaciones confirmadas de dos horas. Se impone una identificación rápida de tales cuerpos transitorios para que otros observatorios continúen siguiéndolo tras el descubrimiento.

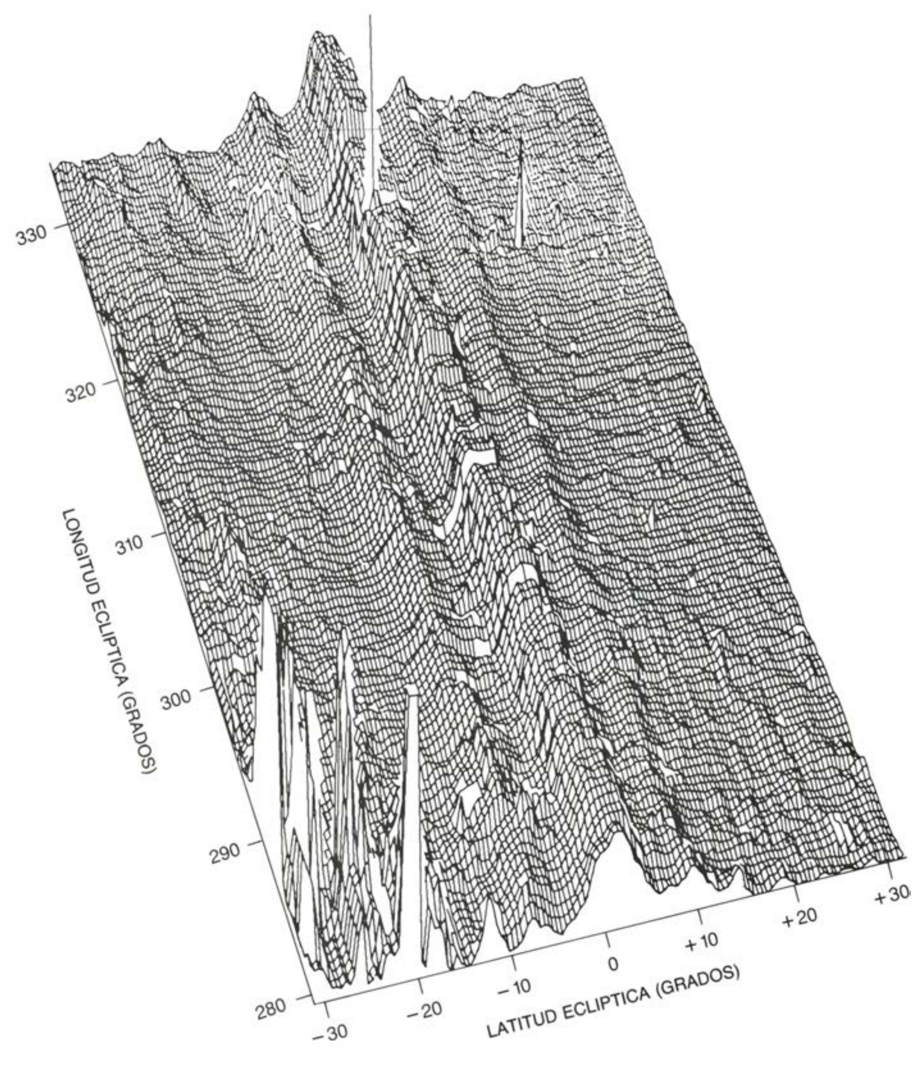
El primer cometa localizado por el *IRAS* se apreció el 26 de abril; lo descubrieron también dos astrónomos aficionados, por lo que se designó cometa IRAS-Araki-Alcock. El 11 de mayo pasó a una distancia de tres millones de kilómetros de la Tierra, más cerca que ningún otro cometa en los últimos 200 años. La apariencia de la cabeza era muy similar en las longitudes de onda del visible y del infrarrojo, pero las imágenes de la cola revelaron diferencias notables. La cola visible era débil, estrecha y bastante corta; las imágenes infrarrojas mostraron, por contra, una cola amplia y brillante, que se extendía, al menos, hasta 200.000 kilómetros, si no llegaba a los 400.000.

Se cree que los cometas están constituidos por hielo mezclado con algo de polvo. Ahora bien, las partículas de las regiones más distantes de la cola no pueden ser de hielo, pues se habrían evaporado al trasladarse de la cabeza a la cola. De aquí que la materia de la cola larga deba ser polvo y entren, en su probable composición, los silicatos. Sale expulsada del cometa a un ritmo de unos 200 kilogramos por segundo, bastante más rápidamente de lo que sugerían estimaciones anteriores.

En su misión, el *IRAS* había descubierto cuatro cometas más y había realizado también observaciones de Tempel 2, un cometa conocido por sus 16 apariciones anteriores en el sistema solar interno. A longitudes de onda visibles, Tempel 2 parece sin cola; se suponía que todo el material volátil había sido eliminado durante anteriores acercamientos al Sol. La imagen del *IRAS* reveló un apéndice largo y estrecho, que se extendía a 30 millones de kilómetros del núcleo cometario.

Con un cuerpo de las características de los cometas, descubierto el día 11 de octubre, vino la solución de un pequeño misterio. Se le designó 1983 TB. Al principio se le tomó por un asteroide de la clase Apolo, objetos que siguen trayectorias que pasan al interior de la órbita terrestre. La trayectoria de 1983 TB lo lleva, en efecto, al interior de la órbita de Mercurio, hasta 20 millones de kilómetros de la superficie solar. Pronto se vio que la órbita de 1983 TB se correspondía muy estrechamente con las órbitas de los meteoritos Gemínidos, que crean un chubasco meteorítico anual en diciembre. Otros chubascos meteoríticos se originaron a partir de restos de cometas, pero nunca se había identificado la fuente de los chubascos de los Gemínidos. Como 1983 TB es, evidentemente, el cuerpo generador del chubasco de los Gemínidos, se cree ahora que no es un asteroide, sino los restos de un cometa apagado.

Otro cuerpo del sistema solar que se está buscando en los datos del *IRAS* es un hipotético décimo planeta, más allá de la órbita de Plutón. Se ha propuesto muchas veces la existencia de tal planeta para explicar anomalías en la órbita de Neptuno; la emisión infrarroja es el signo que con más probabilidad delatará su presencia. En realidad, de existir un décimo planeta, la prueba podrá, casi con toda seguridad,



7. BANDAS DE POLVO DEL SISTEMA SOLAR constituidas por materia finamente dividida y en órbita a la misma distancia del Sol que el cinturón de asteroides (entre los planetas Marte y Júpiter). La gráfica muestra la intensidad de la radiación recibida en la banda de 60 micrometros en función de la latitud y longitud eclípticas. La cresta central revela un anillo de polvo dentro del plano eclíptico; puede haberse formado por erosión de los asteroides. Las dos bandas a uno y otro lado son más difíciles de explicar. Indican que hay cierta cantidad de polvo en órbitas inclinadas unos nueve grados con respecto a la eclíptica; cabe la posibilidad de que esta materia se formase por choque de un cometa con un asteroide.

encontrarse entre las fuentes puntuales del *IRAS* que no satisfacen los complicados criterios de confirmación. Hasta ahora no se ha descubierto.

Tal vez la mayor sorpresa de la misión *IRAS* llegó muy al principio, cuando los instrumentos se estaban calibrando mediante observaciones de estrellas próximas y brillantes. Una de esas "candelas patrón" era la joven y caliente estrella Vega, o Alfa de la Lira, a 26 años-luz del Sol, que, a longitudes de onda visibles, es la quinta estrella en brillo de la totalidad del firmamento. Vega tiene una masa de dos veces y media la del Sol y multiplica por 50 el brillo de éste. Se ha observado ampliamente a longitudes de onda que se extienden desde el ultravioleta hasta unos 20 micrometros; se presumía de conocer bien sus propiedades. En particular, los modelos teóricos habían tenido mucho éxito al explicar el espectro visible de la estrella. Las medidas del *IRAS* a 12 micrometros concordaban con los modelos, pero a longitudes de onda más largas había una importante discrepancia. La emisión, que tenía que caer bruscamente más allá de 25 micrometros, permanecía casi constante.

Ahora se puede ofrecer, con cierta confianza, una explicación del exceso de radiación infrarroja en Vega. La emisión en onda larga proviene de su copiosa abundancia de partículas pequeñas que forman un anillo alrededor de la estrella, a unas 85 unidades astronómicas de distancia. El razonamiento que llevó a tal conclusión ilustra la manera cómo se interpretan los datos del *IRAS*.

Hay muchos ejemplos de estrellas calientes rodeadas de materia más fría; se trata de gas y polvo expelidos por la propia estrella, sujetos por tanto a continua renovación. Pero Vega no está perdiendo materia; por consiguiente, las partículas que la rodean deben encontrarse en órbitas estables. La cadena de deducciones mediante la cual se caracterizó la materia comienza con una estimación de su temperatura; dadas ciertas hipótesis simplificadoras, la forma del espectro infrarrojo implica una temperatura de 85 grados Kelvin. El radio de la nube se determinó mediante observaciones especiales obtenidas con el menor de los detectores de 60 micrometros, a fin de alcanzar la máxima resolución espacial posible.

La estimación del tamaño de las partículas requiere hilar más fino. Si las partículas fueran del tamaño de los granos de polvo interestelar, que no suelen alcanzar el micrometro de diámetro, la presión de la radiación de Vega los habría expulsado hacia fuera. Las partículas mayores, sin llegar al milímetro de diámetro, habrían sucumbido a un efecto opuesto: cediendo momento angular a la radiación estelar, habrían descrito órbitas espirales hasta caer en la atmósfera de la estrella. Además, como las partículas radian eficazmente a 25 micrometros, no parecen ser inferiores a este diámetro. Estas consideraciones permiten establecer un límite inferior para el tamaño de las partículas. El límite superior viene dado por el flujo observado de radiación infrarroja: muchas partículas pequeñas, al tener mayor superficie, radian con mayor eficacia que unas pocas mayores. Si la materia se hubiera aglomerado en la banda para formar un planeta único, no se hubiera detectado.

Los gránulos semejantes a gravilla del anillo de Vega tienen una masa total aparente del 1 por ciento de la masa de la Tierra. Podría muy bien ocurrir que hubiese cuerpos mayores, no observados; si la distribución del tamaño de las partículas es la del cinturón de asteroides del sistema solar, la masa total de la materia en órbita podría multiplicar por 300 la masa terrestre. El anillo de Vega es el primer ejemplo convincente de la existencia de materia sólida en órbita alrededor de una estrella distinta del Sol; puede muy bien representar una fase primitiva en la condensación de un sistema planetario. Vega quizá no se remonte más allá de unos cientos de millones de años –comparada con los 4500 millones del Sol; el propio sistema solar pudo atravesar idéntica fase de evolución cuando el Sol tenía la misma edad.

Al hilo del descubrimiento del anillo de Vega, se hizo una exploración en otras estrellas próximas que pudieran tener materia en órbita. Se vio que 50 de ellas manifestaban un exceso de radiación infrarroja, difícil de explicar mediante otros mecanismos; mas sólo en un caso hay indicación de partículas de tamaño milimétrico en órbita alrededor de la estrella. El segundo candidato es Fomalhaut, una estrella del hemisferio Sur que tampoco llega a los mil millones de años de antigüedad.

Una tarea para la cual el *IRAS* iba particularmente bien dotado era la recogida de estadísticas de vida sobre el nacimiento y muerte de las estrellas. De acuerdo con la teoría dominante, las estrellas se forman por condensación de una región densa dentro de una nube de gas y polvo. La nube circundante oculta a la observación visual los primitivos estadios de la evolución estelar. De manera semejante, muchas estrellas envejecidas expulsan grandes cantidades de gas y polvo y quedan envueltas en una nube de propia creación. Las observaciones infrarrojas son sensibles a las emisiones térmicas procedentes del propio polvo, con lo que ofrecen un medio efectivo de detectar y estudiar tales procesos.

En los últimos años, las regiones de formación de estrellas han sido objeto de atenta observación por parte de instrumentos con base en tierra y otros en vuelo. Se ha prestado máximo interés al nacimiento de estrellas grandes y calientes; las más pequeñas y más típicas de la población estelar (y también de masa más parecida al Sol) eran demasiado débiles para su observación. Uno de los mayores beneficios de la exploración del *IRAS* puede ser la de aportar una muestra más representativa de las estrellas muy jóvenes.

En su búsqueda de nuevas estrellas, *IRAS* exploró una pequeña y oscura nube llamada Barnard 5, en la constelación de Perseo. Se detectaron cuatro fuentes discretas de emisión infrarroja. Parece que la más brillante está alimentada por una estrella nueva, de tamaño y masa solares, aunque diez veces más luminosa. Estas características están de acuerdo con modelos de evolución estelar que indican que los primeros 100.000 años en la vida de tal estrella constituyen un episodio de brillo excepcional. La estrella no se ha visto con los detectores; lo que se registra es la radiación del polvo que la estrella ha calentado entre 30 y 800 grados Kelvin.

En la nube llamada Camaleón 1, en el cielo meridional, se descubrió un gran nido de estrellas jóvenes. Se identificaron unas 70 fuentes, aunque algunas sean "estrellas de campo de visión", sin relación con la nube: caen simplemente a lo largo de la misma visual. Algunas de las otras fuentes de la nube se agrupan en tal densidad que impiden cualquier análisis individual. Entre los objetos restantes, hay 17 que se parecen a las estrellas recién nacidas de Barnard 5. Algunas de ellas están inmersas en la nube; otras se han separado, pero conservan todavía un velo de polvo. Veinticinco fuentes se han identificado como aglomeraciones frías de materia; algunas estarían a punto de condensarse para formar estrellas.

En el extremo opuesto de la escala de edad estelar, hay gigantes rojas frías que están acercándose al punto final de la evolución: se desintegrarán en una nebulosa planetaria o (más raramente) explotarán en una supernova. Tales estrellas expulsan grandes cantidades de gas y polvo, formando un espeso manto

que absorbe la radiación estelar y la reemite en el infrarrojo.

Al evolucionar la gigante roja, diríase que se acelera la velocidad de pérdida de masa. Al principio, la estrella expulsa cantidades de materia iguales a la masa solar cada 100.000 años; después, la misma cantidad de materia se pierde cada 10.000 años. Las estrellas de este segundo grupo no se distinguen en la luz visible, pero sí se detectan a longitudes de onda del infrarrojo intermedio. Algunas de ellas se conocían antes del lanzamiento del *IRAS* por estudios en infrarrojo con base en superficie y a partir de radioobservaciones de las emisiones de las moléculas hidroxilo (OH); se conocen como estrellas OH/IR. El *IRAS* ha descubierto muchas más, incluyendo ejemplos extremos.

La mayoría de las estrellas son variables en esta fase de su existencia, lo que denuncia quizá que se está acabando su provisión de combustible nuclear. Los resultados del *IRAS*, sin embargo, muestran que las fuentes infrarrojas más extremas no varían. Es posible que su combustible esté tan agotado que no llegue ni siquiera a alimentar pulsaciones. No se ha avanzado todavía ninguna interpretación convincente; sin embargo, de los misterios que rodean la fase moribunda de la evolución estelar algunos quizá los resuelva el análisis más detallado de los datos. Los espectros obtenidos con el espectrómetro del *IRAS* serán de gran importancia, pues revisten particular utilidad para clasificar objetos de esta clase.

Un blanco obvio para la investigación astronómica es la región central de la Vía Láctea, a unos 30.000 años-luz de la posición del sistema solar en uno de los brazos espirales de la galaxia. Densas concentraciones de polvo ocultan el núcleo de la galaxia a las longitudes de onda visibles; las observaciones de radio y las del infrarrojo ofrecen, pues, la única vía de acceso. Las imágenes *IRAS* del núcleo no son, en manera alguna, las más detalladas de las realizadas hasta ahora –otros instrumentos han ofrecido resolución espacial más alta–, pero son capaces de mostrar fuentes mucho más débiles que las detectadas en imágenes infrarrojas anteriores y su campo de visión da un panorama sin precedentes.

Cierto número de estructuras cerca del núcleo galáctico, que aparecen en forma prominente en mapas obtenidos a longitudes de onda de radio, son también conspicuas en las imágenes del *IRAS*. Se pueden percibir configuraciones difusas demasiado grandes para encajar dentro del campo de visión de otros instrumentos. Tal vez las más notables sean las briznas de materia fría que se extienden desde el núcleo hacia arriba y hacia abajo del plano galáctico. En las fotografías aparecen como delicadas volutas de humo, pero su escala es enorme.

Fuera de la Vía Láctea, el *IRAS* detectó al menos 10.000 galaxias. En la mayoría de los casos, su luminosidad en el infrarrojo aumenta sin cesar con la longitud de onda; presentan, pues, su máximo brillo en la banda de 100 micrometros. En virtud de la interferencia de los cirros infrarrojos se detectan con mayor facilidad, sin embargo, a 60 micrometros.

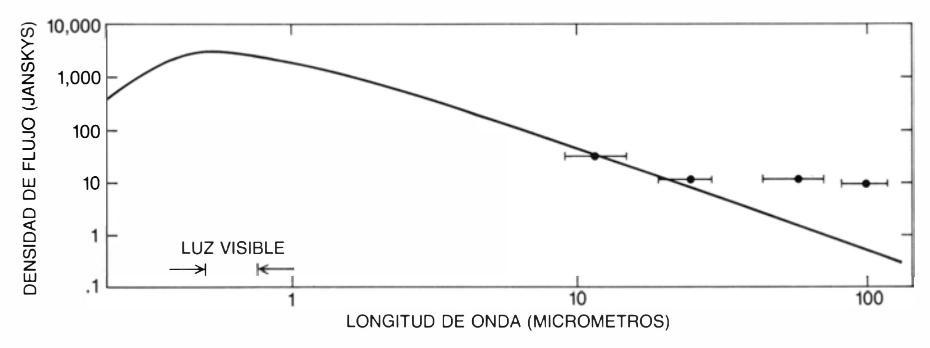
El nivel de actividad infrarroja en las galaxias varía entre amplios límites. En algunos casos, la fracción de la emisión total que corresponde al infrarrojo viene a resultar despreciable; en otros, casi toda la radiación emergente de las galaxias es infrarroja. En general, la variación está correlacionada con la cantidad de polvo de la galaxia. Las elípticas están en gran parte libres de polvo y tienen escasa luminosidad infrarroja; el *IRAS* detectó pocas. Las galaxias espirales son mucho más polvorientas; casi todas las que brillan fueron detectadas en el infrarrojo, así como un considerable número que no se había encontrado en las exploraciones realizadas con luz visible.

Hay una galaxia espiral comparativamente cercana: la M31, o gran "nebulosa" de Andrómeda. El *IRAS* resolvió los rasgos infrarrojos de M31; mostró que la mayor parte de la radiación de onda larga proviene de dos regiones: el núcleo de la galaxia y un anillo coincidente con vías de polvo en los brazos espirales. Los detalles de la estructura del anillo concuerdan estrechamente con la distribución de las nubes de hidrógeno detectada por los radiotelescopios. Así, el anillo es una zona rica en materia interestelar y es, probablemente, sede de activa formación de estrellas. El grueso de la emisión infrarroja del anillo proviene seguramente de los granos de polvo calentados por estrellas recién formadas.

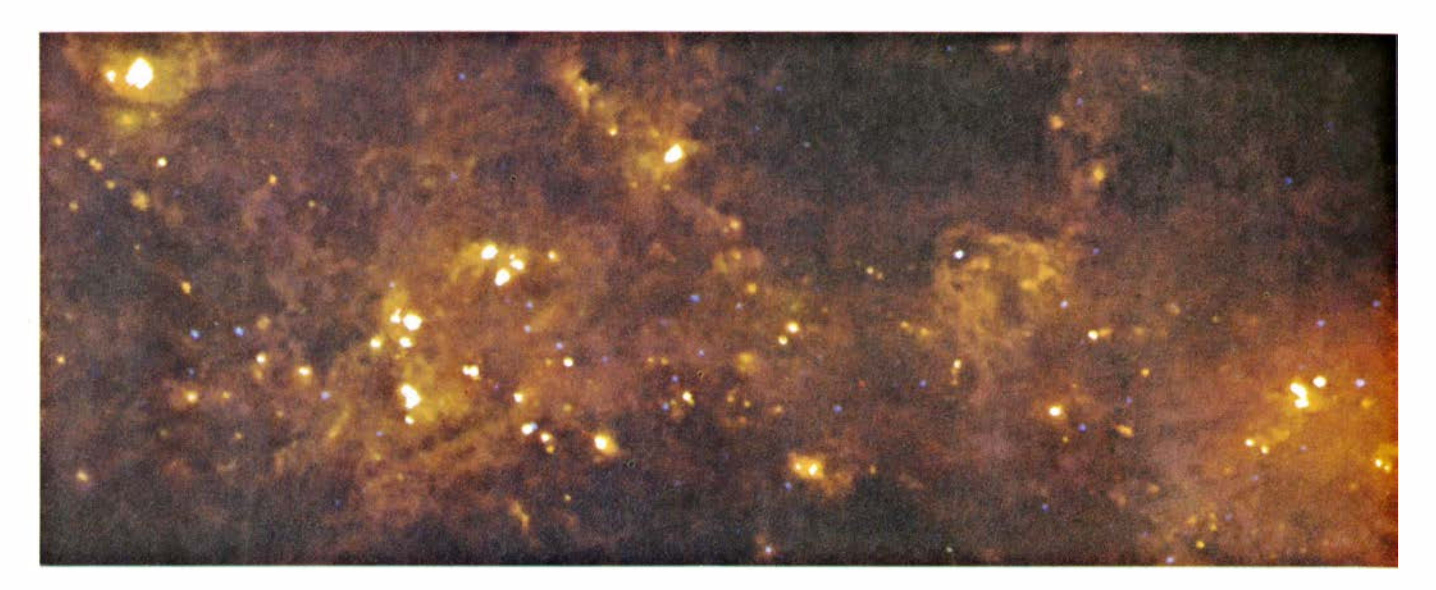
El *IRAS* no hubiera detectado la M31 de no caer tan próxima; intrínsecamente, es una galaxia muy débil en el infrarrojo. No se trata de ninguna zona de intensa formación de estrellas. El cociente de su radiación infrarroja a su emisión de luz azul es de sólo 0,03. La Vía Láctea, en comparación, emite aproximadamente iguales cantidades de radiación infrarroja y de luz azul. Otras galaxias brillan todavía más en el infrarrojo. En una exploración limitada a un 1 por ciento del cielo, *IRAS* detectó 86 galaxias cuyas relaciones de infrarrojo a azul variaban de 0,5 a 50; el cociente típico era de cinco.

Cuando se anunciaron, hace un año, los resultados de la exploración limitada, quedaban nueve fuentes infrarrojas que no se habían identificado con ningún objeto visible en las fotografías obtenidas con luz visible. Ya se ha encontrado explicación para esas nueve fuentes. Una resultó ser una aglomeración de materia en los cirros infrarrojos; las ocho restantes correspondían a galaxias distantes que emiten enormes cantidades de radiación infrarroja. Sus cocientes de infrarrojo a azul varían de 30 a 500, y su emisión en longitudes de onda del infrarrojo está entre 10 y 100 veces la luminosidad total (a todas las longitudes de onda) de una galaxia espiral normal.

El mecanismo responsable de la emisión de las galaxias brillantes en el infrarrojo parece ser el mismo que en las galaxias más corrientes, a saber, el calentamiento de granos de polvo por estrellas recién formadas. No podemos excluir, sin embargo, la posibilidad de que algunas de las galaxias tengan in-



8. ANILLO DE MATERIA SOLIDA en órbita alrededor de Vega. Fue este un descubrimiento sorprendente registrado a principios de la misión *IRAS*. Se esperaba que el espectro de Vega siguiese la curva indicada por la línea continua, decreciendo a longitudes de onda más largas. No ocurrió tal. El espectro permanece horizontal entre 25 y 100 micrometros, lo que denuncia la presencia de materia sólida y fría. Al parecer, partículas del tamaño de gravilla describen órbitas en torno a Vega, a una distancia de 85 unidades astronómicas. Pueden representar una fase primitiva de la formación de un sistema planetario.



9. LUGARES DE FORMACION DE ESTRELLAS, identificados en una región polvorienta de uno de los brazos espirales de la Vía Láctea. Se representan aquí en una imagen en falso color que cubre una zona del cielo de 28 por 11 grados. La mayor parte del polvo está muy frío y radia, principalmente, en la banda de 100 micrometros, por cuya razón aparece en rojo. En los lugares donde las estrellas están inmersas en la nube, calientan la materia circundante, que radia a su vez a longitudes de onda más cortas. Estudios desde el suelo a longitudes de onda de radio e infrarrojos sacaron antes a luz tres zonas brillantes cerca del centro de la imagen y las reconocieron como sedes de activa formación estelar. El *IRAS* proporcionó la primera vista de la zona.

tensas fuentes no térmicas, como las que alimentan los núcleos galácticos "activos" en los quasars y objetos similares. Las fuentes no térmicas podrían quedar oscurecidas por el polvo.

Si la formación de estrellas es la causa de las emisiones, la más brillante de las galaxias debe estar pasando por una intensa fase de producción de ellas. La materia interestelar se está concentrando en estrellas, a un ritmo que varía desde 40 a 400 masas solares por año; a esa velocidad, la masa entera de la materia contenida en una galaxia pasaría por el ciclo de formación de estrellas en unos mil millones de años, o quizá menos. Como el universo es mucho más antiguo (se estima en 15.000 millones de años), tamaña actividad de formación estelar debe ser un fenómeno de corta duración.

Algún interés debe encerrar que un desproporcionado número de las galaxias brillantes en el infrarrojo posean vecinas próximas o parezcan estar deformadas. Aproximadamente una cuarta parte de las 86 galaxias identificadas en la exploración limitada se ajustan a esta descripción, y lo hacen también siete de las ocho fuentes que se clasificaron inicialmente como no identificadas. Las interacciones gravitatorias, o incluso las colisiones entre galaxias, podrían desencadenar un brote de formación de estrellas.

La galaxia designada como Arp 220 nos proporciona un ejemplo bastante próximo de los procesos que alimentan los focos infrarrojos más distantes. Arp 220 se clasificó visualmente como una "galaxia con lazos adyacentes"; puede ser el producto de la fusión reciente de dos galaxias. Tiene una relación de infrarrojo a azul de 80; emite el 99 por ciento de su radiación a longitudes de onda del infrarrojo. La alta proporción de radiación infrarroja no es el resultado de la debilidad en otras longitudes de onda; por el contrario, la galaxia tiene una luminosidad visible normal y constituye una fuente brillante de radioemisión. No hay deficiencia de emisión visible o de radio, sino un gran exceso de emisión infrarroja.

Los más luminosos de todos los objetos del universo son los quasars y objetos similares, como las galaxias de Seyfert y las radiogalaxias, distantes y extremadamente brillantes que se consideran galaxias con núcleos activos. Se cree que, en muchos casos, el núcleo aloja un agujero negro de enorme masa rodeado de un disco de acumulación de materia recogida de la galaxia. A medida que la materia del disco de acumulación describe espirales hacia el agujero negro, una fracción de su masa se convierte en energía. La energía aparece por último como radiación electromagnética a lo largo de un amplio dominio de longitudes de onda, desde las de radio hasta los rayos X.

Se ha supuesto que los quasars y otros núcleos galácticos activos emitirían importantes cantidades de energía en el infrarrojo; mas debido a la atenuación con la distancia, eran posibles pocas observaciones. El *IRAS* permitió detectar cierto número de esas fuentes; los datos correspondientes se han analizado ya para algunas de ellas.

La intensa radiofuente 3C 390,3 está asociada con una galaxia elíptica gigante, situada a más de mil millones de años-luz de distancia. Sus emisiones se habían estudiado en longitudes de onda de radio, del visible y rayos X, pero el *IRAS* dio la primera perspectiva en el infrarrojo lejano. Se obtuvieron unos resultados inesperados. Se detectó la galaxia en las cuatro bandas; pero además se vio que emitía la mayor parte de su energía en el infrarrojo. La emisión máxima tiene lugar en la banda de los 25 micrometros, algo poco corriente. La mayor parte de las otras galaxias activas son más intensas a 60 micrometros. El mecanismo que produce la emisión de 25 micrometros es incierto. La circunstancia que parece más probable es la reemisión debida al polvo interestelar calentado por la radiación ultravioleta del núcleo. La emisión infrarroja podría, en sí, ser de origen no térmico, aunque la ausencia de cualquier variabilidad durante los meses en que el *IRAS* observó la galaxia pone en entredicho esta interpretación.

Los quasars se dividen en dos grupos: radiofuertes y radiodébiles. Los procesos físicos que subyacen a esta distinción desconciertan. A las longitudes de onda de radio, sus luminosidades difieren en un factor de 100.000 unidades o más, pero sus espectros en la banda del visible y ultravioleta se parecen notablemente. Los espectros deben diferir sensiblemente en la región entre el visible y la banda radio, es decir, en el infrarrojo; tales diferencias pueden ofrecer algún indicio del mecanismo de producción de la energía.

Las observaciones del *IRAS* se han analizado para tres quasars radiofuertes y para dos radiodébiles. No se en-



10. NUCLEO DE LA VIA LACTEA. Resplandece a través del denso velo de polvo que lo oculta en las fotografías con luz visible. Los pormenores del mismo se habían examinado en estudios anteriores, en bandas de radio e infrarrojos, pero el *IRAS* aportó la primera vista de gran campo de la región en longitudes de onda del infrarrojo extremo. La imagen muestra una región de 16 por 11 grados. La mayoría de los detalles brillantes son regiones conocidas de gas ionizado y polvo: las regiones HII; pero muchas estructuras extensas, así las briznas de polvo que aparecen encima y debajo del plano galáctico, cerca del núcleo, se nos ofrecían por primera vez. La imagen es una composición en falso color construida reuniendo los datos de tres bandas del *IRAS*.

contraron diferencias espectaculares en la distribución de la energía sobre las cuatro bandas, lo que revela que las diferencias entre los espectros se deben producir más allá de los 100 micrometros. Apareció, sin embargo, una discrepancia más sutil. Para las fuentes radiofuertes, las medidas en el infrarrojo se ajustan suavemente a un espectro continuo que cubre el hueco entre las bandas visible y de radio. Para los quasars radiodébiles, una línea semejante que conectase las dos porciones del espectro debería tener una pendiente mucho más destacada indicando que las emisiones infrarrojas caen más rápidamente a medida que crece la longitud de onda. Las medidas del *IRAS* de las fuentes radiodébiles no pueden ajustarse fácilmente a tal línea; hay un exceso de radiación a 100 micrometros.

Por el momento, cualquier explicación de estos resultados debe ser estrictamente provisional, pero hay una posibilidad de que el exceso de radiación a 100 micrometros tenga relación directa con la naturaleza de la fuente energética del quasar. Se cree que la mayor parte de la energía emitida por los quasars es radiación de sincrotrón, generada por electrones de alta energía en sus movimientos espirales en el campo magnético. Una fuente importante de tales electrones podría ser los chorros de materia que salen del núcleo. La ausencia de discontinuidades en el espectro de los quasars radiofuertes sugiere que toda la radiación detectada proviene de esta fuente. El exceso de radiación infrarroja de los quasars radiodébiles podría tener un origen independiente, a saber, la emisión térmica del polvo de la galaxia circundante. Podemos inferir, por consiguiente, que los quasars radiodébiles son más polvorientos que los radiofuertes. Al interrumpir los chorros de electrones, el polvo podría, incluso, ser responsable de las diferencias en la luminosidad en radioondas.

Aunque la fase observacional de la misión *IRAS* acabó hace un año, el proyecto no está, en manera alguna, terminado. La publicación en el mes de noviembre de 1984 del catálogo de fuentes puntuales y de los atlas de emisiones extensas puso los datos a la amplia disposición de la comunidad de astrónomos. Los análisis e interpretaciones continuarán durante años. De hecho, la mayor parte de lo que el telescopio del *IRAS* "vio" permanece encerrado en los carretes de cinta magnética de registro digital que almacenan los datos, desconocidos incluso para los directamente involucrados en la misión. Las cintas se guardarán en archivo para su consulta lo mismo que se hace con las placas fotográficas de una exploración visual del cielo.

La principal misión de una exploración imparcial del cielo consiste en descubrir nuevos fenómenos físicos u objetos que merezcan examen más detenido, bien a la longitud de onda de la exploración, o en todo el espectro electromagnético. Gran parte del trabajo que seguirá a longitudes de onda fuera de la región infrarroja y algunas de las observaciones infrarrojas, se puede realizar desde el suelo o mediante instrumentos aerotransportados; algunos estudios están ya en curso. Para las fuentes más interesantes, sin embargo, habrá que acudir al infrarrojo lejano desde el espacio.

Con destino a tales observaciones, se están proyectando, para el decenio de los noventa, dos instrumentos orbitales. La Agencia Espacial Europea lanzará el Observatorio Espacial Infrarrojo. Por su parte, la NASA pondrá en el firmamento el Telescopio Infrarrojo Espacial desde el transbordador espacial. Ambos instrumentos tendrán una resolución espacial y espectral más fina que el *IRAS* y también mayor sensibilidad. Si consiguen el mismo éxito que el satélite explorador que abrió el camino, la astronomía infrarroja estará realmente bien servida.

Aterosclerosis, colesterol y receptores de LDL

Los receptores captan y eliminan de la circulación las partículas que transportan colesterol. Muchas personas son especialmente proclives a la aterosclerosis y al infarto de miocardio por poseer un escaso número de receptores de LDL

Michael S. Brown y Joseph L. Goldstein

La mitad de las muertes que se registran en Occidente son producto de la aterosclerosis; en esa enfermedad, el colesterol se acumula en las paredes de las arterias y forma voluminosas placas, que obstaculizan de tal manera el flujo de la sangre que acaba formándose un coágulo. La obstrucción de la arteria, a su vez, provoca un ataque cardiaco o una apoplejía. El colesterol de las placas ateromatosas procede de ciertas partículas que circulan por el torrente sanguíneo, las denominadas lipoproteínas de baja densidad (LDL, por *low-density lipoprotein*). Cuanto más elevado es el nivel sanguíneo de LDL, tanto más rápido es el desarrollo de aterosclerosis.

Los datos epidemiológicos revelan un hecho sorprendente: más de la mitad de la población de los países industrializados de Occidente tiene un nivel de LDL circulante que le expone a un riesgo muy alto de desarrollar aterosclerosis. Puesto que tales concentraciones de LDL son algo corriente, suelen considerarse "normales"; sin embargo, es obvio que no conviene juzgarlas así, ya que predisponen a la aterosclerosis precoz y a los consiguientes infartos, cardiaco o cerebral.

¿Qué determina la elevación del nivel de LDL y por qué en tanta gente su concentración alcanza esas peligrosas cotas? Algo de luz están arrojando los estudios sobre los llamados "receptores de LDL", proteínas especializadas que sobresalen de la superficie de las células animales. Tales receptores captan las partículas de LDL y las extraen del líquido en que están bañadas las células. Las LDL pasan al interior de las células y, al degradarse, liberan el colesterol que va a satisfacer las necesidades celulares. A la vez que proporcionan colesterol a las células, los receptores realizan una segunda función fisiológica, decisiva para el desarrollo de la aterosclerosis: eliminan las LDL del torrente circulatorio.

El número de receptores que las células despliegan en su superficie varía de acuerdo con sus necesidades de colesterol. Cuando son bajas, el colesterol sobrante se acumula; las células producen menos receptores y desciende el ritmo de captación de LDL. Lo cual protege a las células de un exceso de colesterol, pero a un precio muy alto: el descenso en el número de receptores reduce el ritmo de eliminación de LDL de la sangre, se eleva en ésta su nivel y se acelera la aterosclerosis.

Hemos postulado que el elevado nivel de LDL que se advierte en muchas personas es atribuible a una conjunción de factores que disminuyen la producción de receptores de LDL. Por tener en cuenta el papel central de los receptores, se ha logrado el tratamiento de una forma grave de aterosclerosis de origen genético, al tiempo que se ha arrojado algo de luz sobre la persistente controversia acerca de la importancia que pueda tener la dieta en el desarrollo de aterosclerosis.

La historia comienza en 1973, con el descubrimiento, en nuestro laboratorio del Hospital Clínico de la Universidad de Texas, de los receptores de LDL. Estudiábamos entonces cultivos de fibroblastos humanos procedentes de la piel. Como cualquier otra célula animal, los fibroblastos en cultivo necesitan colesterol, uno de los componentes más importantes de la membrana que los envuelve, la membrana plasmática; se sabía ya que los fibroblastos extraían el colesterol de las lipoproteínas del suero que se añade al medio de cultivo. En el suero humano existe una mezcla de varias lipoproteínas, y, según descubrimos, los fibroblastos obtenían la mayor parte de su colesterol de una lipoproteína concreta, la LDL. Relacionamos ese hecho con la presencia, sobre las células, de moléculas de receptores muy específicos que captaban LDL y otras lipoproteínas emparentadas.

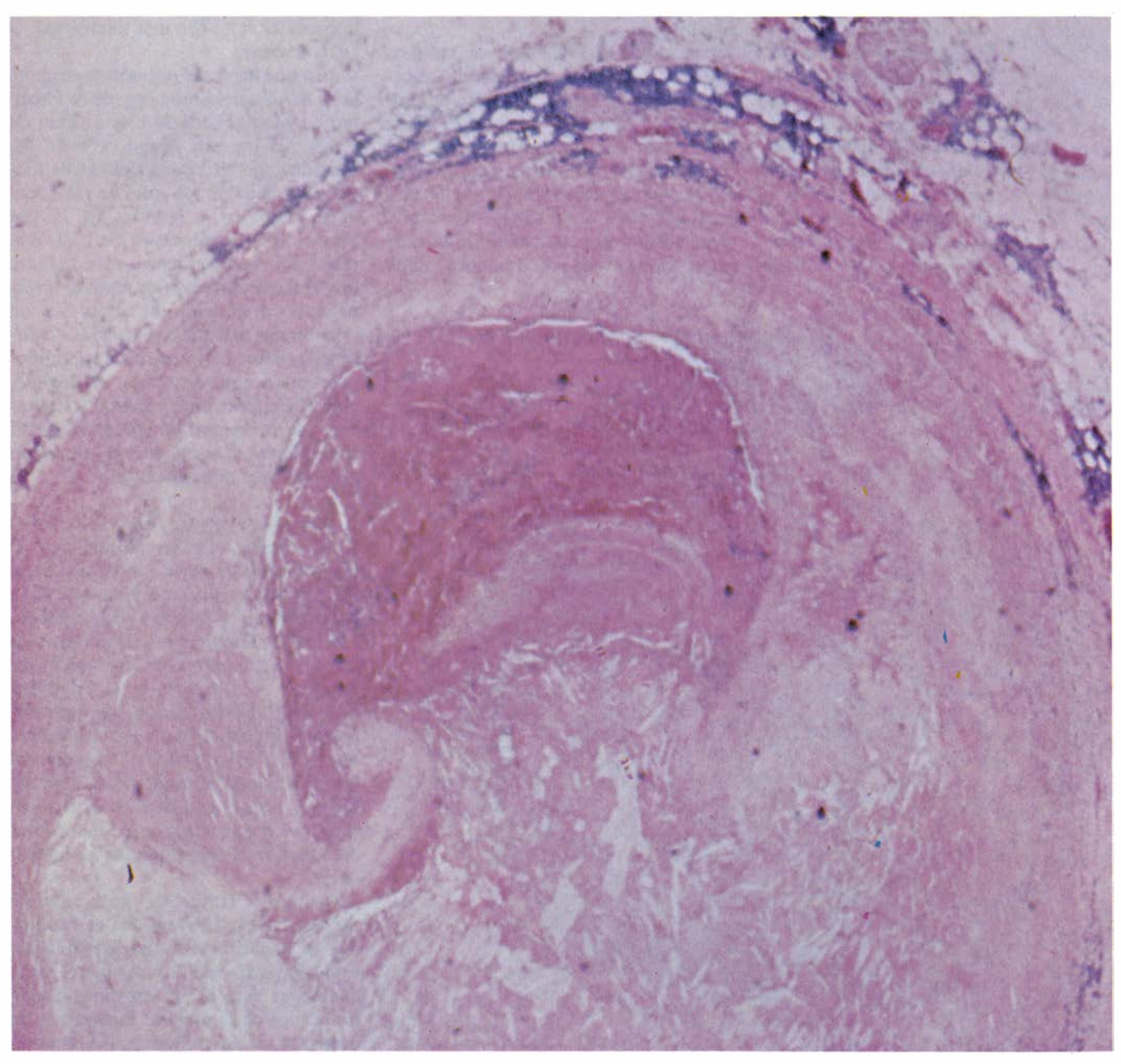
LDL es una gran partícula esférica cuyo núcleo lipídico lo componen unas 1500 moléculas del alcohol graso colesterol, cada una de ellas unida por un enlace éster a un ácido graso de cadena larga. Este núcleo de ésteres de colesterol está envuelto por una capa de fosfolípidos y de moléculas de colesterol no esterificado. Los fosfolípidos están dispuestos de tal modo que sus cabezas hidrofílicas se orientan hacia el exterior, lo que permite que las LDL se disuelvan en la sangre o en el líquido intercelular. Incluida en esta cubierta hidrofílica destaca una molécula de proteína de gran tamaño, a la que se ha dado el nombre de apoproteína *B*-100.

Es precisamente la apoproteína *B*-100 la que reconoce, y a la que se une, el receptor de LDL, una glicoproteína (proteína que lleva cadenas de azúcar en su molécula). El receptor abarca todo el espesor de la membrana plasmática de la célula y el centro de unión se proyecta sobre la superficie celular. El enlace se produce incluso a concentraciones de LDL de 10^{-9} molar, lo que significa que el receptor puede captar una partícula de LDL que esté contenida en unos 1000 millones de moléculas de agua. El receptor capta sólo lipoproteínas que lleven la apoproteína *B*-100 u otra proteína emparentada, la apoproteína *E*.

¿Cómo penetra la LDL en la célula? Uno de nuestros colaboradores, Richard G. W. Anderson, descubrió en 1976 que los receptores se acumulan en regiones especializadas, donde la membrana presenta unas depresiones en

forma de cráteres, los denominados hoyos revestidos (*coated pits*). Su nombre responde a que la superficie interna de la membrana de esas zonas está recubierta de clatrina, una proteína. Pocos minutos después de su formación, esos hoyos se invaginan y se desprenden de la membrana plasmática, formando vesículas rodeadas de una membrana a las que se da el nombre de vesículas revestidas; cualquier LDL unida a un receptor se transporta así al interior de la célula. (Anderson y nosotros dimos a este proceso el nombre de endocitosis mediada por receptor; se ha reconocido ahora que se trata de un mecanismo general por el que muchas macromoléculas penetran en la célula tras su captura por los receptores específicos.) [Véase "Endocitosis de proteínas y partículas", por Alice Dautry-Varsat y Harvey F. Lodish; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 1984.]

Las LDL se separan posteriormente de su receptor (que vuelve a unirse a la membrana plasmática) y se introducen en un lisosoma, vesícula repleta de enzimas digestivas. Algunas degradan la cubierta de LDL, quedando expuestos los ésteres de colesterol que encierran. Otra enzima rompe el enlace éster que une el ácido graso al colesterol, liberándose el colesterol no esterificado, que sale del lisosoma. Como hemos indicado, todas las células incorporan ese colesterol a sus membranas recién formadas. En algunas células especializadas, el colesterol extraído de la LDL desempeña otro papel. En las glándulas suprarrenales y en el ovario se convierte en las hormonas esteroideas cortisol y estradiol, respectivamente; en el hígado se transforma en ácidos biliares, compuestos que



1. COAGULO de una arteria coronaria que quitó la vida a un hombre de 76 años afecto de aterosclerosis avanzada. En el transcurso de los años, el colesterol transportado en la sangre por las partículas de lipoproteínas de baja densidad (LDL) se fue infiltrando en las paredes de la arteria, formando un abultado depósito (*rosa pálido*) que estrechaba la luz. El coágulo se formó súbitamente, obstruyendo el flujo sanguíneo y causando la necrosis del músculo miocardio, al que llegaban por esta arteria oxígeno y nutrientes. La formación del coágulo (*rojo oscuro*) parece haberse disparado por la rotura del revestimiento interno de la arteria, que puso en contacto la sangre y los cristales de colesterol (*objetos alargados en forma de aguja*). La microfotografía, que muestra el corte de la arteria a un aumento de 37 diámetros, es obra de L. Maximilian Buja, del Hospital Clínico de la Universidad de Texas en Dallas.

se vierten al intestino y participan en la digestión.

La cantidad de colesterol que se libera de las LDL controla el metabolismo del colesterol en la célula. La acumulación modula tres procesos. En primer lugar, reduce la capacidad de la célula para elaborar su propio colesterol, pues interrumpe la síntesis de la enzima HMG CoA reductasa, que cataliza uno de los pasos de la vía biosintética del colesterol. La supresión de esta enzima obliga a la célula a depender del colesterol externo, que procede de la captación de LDL por sus receptores específicos. En segundo lugar, la entrada del colesterol procedente de la LDL promueve, activando la enzima llamada *ACAT*, el almacenamiento de colesterol en la célula. Esa enzima reincorpora un ácido graso a las moléculas de colesterol que sobran, haciendo de ellas ésteres de colesterol que se depositan en pequeñas gotas intracelulares de almacenamiento. En tercer lugar, y aquí el que más nos interesa, la acumulación de colesterol en la célula pone en marcha un mecanismo de retroinhibición que insta a la célula a detener la síntesis de nuevos receptores de LDL. Las células ajustan el número de sus receptores de modo que se incorpore el colesterol suficiente para cubrir sus necesidades sin que se produzca exceso. Por ejemplo, los fibroblastos en fase activa de división, y que por consiguiente requieren un aporte de material para la formación de nuevas membranas, mantienen una dotación máxima de receptores de LDL (unos 40.000 por célula). En las células que han superado la fase de multiplicación, el colesterol que les sigue llegando del exterior comienza a acumularse, y el sistema de retroinhibición reduce a un décimo la producción de receptores.

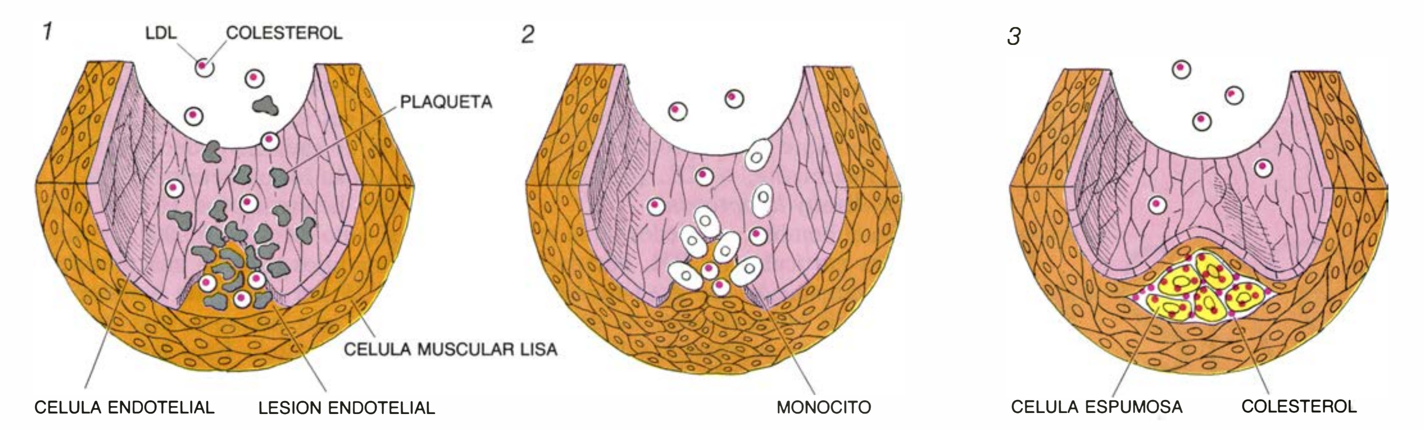
Nuestras observaciones en cultivos de tejidos se han confirmado al demostrarse el importante papel que desempeña el sistema de receptores. Poco después de que descubriéramos el receptor de LDL en cultivos de fibroblastos se constató su presencia en los elementos formes de la sangre humana y en las membranas de muchos tejidos de ratón, perro, vaca y del hombre. Cabe estimar el número relativo de receptores, y su funcionamiento, en animales vivos y en el hombre (en sujetos voluntarios), por inyección intravenosa de LDL marcada con un isótopo radiactivo y posterior determinación del ritmo con que desaparece del torrente circulatorio. Se ha visto que esa tasa depende del número de receptores desplegados en todas las células del cuerpo. ¿Cómo probarlo? Modificando la apoproteína *B*-100 antes de inyectar la LDL, de tal modo que quede impedida su unión a los receptores. James Shepherd y Christopher J. Packard, de la Universidad de Glasgow, demostraron que la LDL modificada permanecía en la circulación mucho más tiempo que la LDL normal.

¿En qué lugar del organismo se capta la LDL? Daniel Steinberg, de la Facultad de Medicina de la Universidad de California en San Diego, y John M. Dietschy, del Hospital Clínico de Dallas, han demostrado que, en ratas, conejos, cobayos y monos, un 75 por ciento de la desaparición de LDL mediada por receptor ocurre en el hígado. Por nuestra parte hemos medido directamente el número de receptores en membranas plasmáticas aisladas de distintos tejidos. La mayoría de los tejidos poseen receptores, pero el hígado, glándula suprarrenal y ovario (órganos con una necesidad de colesterol particularmente elevada) los muestran en proporciones más elevadas.

¿Cuál es el origen de las LDL circulantes? El mecanismo por el que se producen no se conoce con detalle, y es mucho más complejo que el de su captación y ulterior degradación. LDL es un componente del sistema de transporte sanguíneo de dos sustancias lipídicas, el colesterol y los triglicéridos. Cabe dividir ese sistema de transporte de lípidos en dos vías: una exógena, para el colesterol y los triglicéridos absorbidos por el intestino, y otra endógena, para el colesterol y los triglicéridos que llegan a la sangre procedentes del hígado y de otros tejidos no intestinales.

Richard J. Havel, de la Facultad de Medicina de la Universidad de California en San Francisco, ha esclarecido, junto con otros autores, la vía exógena. Comienza ésta en el intestino, donde los lípidos de la dieta se incorporan en partículas de lipoproteína, los denominados quilomicrones, que entran en la circulación y ceden los triglicéridos al tejido adiposo (para su almacenamiento) y al músculo (para su oxidación y producción de energía). Lo que queda del quilomicrón, con su contenido enri-

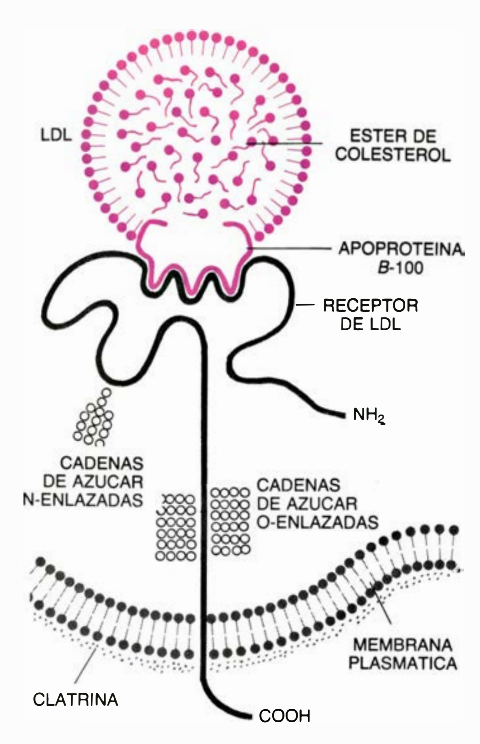
2. LDL, EL TRANSPORTADOR PRINCIPAL DE COLESTEROL en el torrente sanguíneo, es una partícula esférica con una masa de tres millones de dalton y un diámetro de 22 nanómetros (millonésimas de milímetro). El núcleo de la partícula lo componen unos 1500 ésteres de colesterol, en los que cada molécula de colesterol está unida por un enlace éster a un ácido graso de cadena larga. El núcleo lipídico de la partícula está protegido del plasma acuoso por una cubierta de detergente formada por unas 800 moléculas de fosfolípidos, 500 moléculas de colesterol no esterificado y una molécula proteica de gran tamaño, la apoproteína *B*-100, que actúa de enlace. El incremento del nivel de colesterol, con el riesgo consiguiente de acelerar la aterosclerosis, suele corresponder a una elevación de la LDL circulante.



3. PLACA DE ATEROMA en desarrollo. La formación de la placa se inicia con la lesión de la fina capa de células que reviste la luz de la arteria. Según el modelo propuesto por Russell Ross y John A. Glomset, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Washington, el endotelio lesionado se hace permeable y permite la penetración de partículas de lipoproteínas de baja densidad (LDL) y de plaquetas (*1*). En respuesta a la liberación, por parte de las plaquetas, de sustancias de tipo hormonal, verbigracia un factor de crecimiento, las células musculares lisas de la capa que rodea al endotelio se multiplican y emigran a la zona lesionada (*2*); simultáneamente, los glóbulos blancos de la sangre llamados monocitos invaden el área lesionada y se transforman en macrófagos, un tipo especial de células recogedoras de residuos. Las células de la musculatura lisa y los macrófagos ingieren y degradan la LDL y se convierten en células espumosas. Si el nivel sanguíneo de LDL es demasiado elevado, el colesterol procedente de las partículas de LDL se acumula en el interior y alrededor de las células espumosas. El colesterol, las células y residuos acumulados constituyen el ateroma que va cerrando la luz arterial (*3*).

LDL
ESTER DE COLESTEROL
APOPROTEINA *B*-100
RECEPTOR DE LDL
MEMBRANA PLASMATICA
HOYO REVESTIDO
CLATRINA
VESICULA REVESTIDA
VESICULA EN RECICLAJE
ENDOSOMA
LISOSOMA
AMINOACIDOS
APARATO DE GOLGI
SINTESIS DE RECEP. DE LDL
SINTESIS DE COLESTEROL
ADN
ARN
HMG CoA REDUCTASA
INHIBE
INHIBE
3
1
RECEPTOR
EXCESO DE COLESTEROL
MEMBRANAS CELULARES, HORMONAS ESTEROIDEAS Y ACIDOS BILIARES
2
COLESTEROL
RETICULO ENDOPLASMATICO
PROTEINA DEL RECEPTOR
RIBOSOMA
ACTIVA
ACAT
ALMACENAMIENTO DE ESTERES DE COLESTEROL

4. ENTRA LDL CIRCULANTE en las células por un mecanismo de endocitosis mediada por receptor. La LDL se une a un receptor en un hoyo revestido (*coated pit*), que se invagina y se desprende de la membrana plasmática para formar una vesícula revestida. La fusión de varias vesículas da lugar a un endosoma, en cuyo interior la acidez del medio provoca la disociación de la LDL de su receptor, que emigra de nuevo a la superficie celular. La LDL es entregada a un lisosoma, donde las enzimas degradan la apoproteína *B*-100 hasta sus aminoácidos y rompen el enlace éster, liberándose el colesterol para cubrir la síntesis de nuevas membranas y otras necesidades de la célula. El nivel intracelular de colesterol está sometido a autorregulación. Un exceso de colesterol en el interior de la célula ejerce tres efectos sobre el metabolismo. Inhibe la enzima HMG CoA reductasa, que controla la tasa de síntesis del colesterol (*1*); activa la enzima *ACAT*, que esterifica el colesterol destinado al almacenamiento (*2*) e inhibe la producción de receptores de LDL, al suprimir la transcripción del gen del receptor en ARN mensajero (*3*), que se traducirá en los ribosomas del retículo endoplasmático a proteína del receptor.



5. RECEPTOR DE LA LDL, una glicoproteína incluida en la membrana plasmática de la mayoría de las células corporales. Wolfgang J. Schneider lo purificó a partir de la glándula suprarrenal en el laboratorio de los autores. David W. Russell y Tokuo Yamamoto clonaron el ADN complementario obtenido de su ARN mensajero. Se dedujo su secuencia de nucleótidos y a partir de ella se desentrañó la secuencia de los 839 aminoácidos constitutivos de la proteína del receptor. Se identificaron entonces los lugares de unión de las moléculas de azúcar a los átomos de nitrógeno (*N*) y oxígeno (*O*), así como el segmento que posiblemente atraviese la membrana. La forma precisa del receptor no se conoce aún; la representación que aparece aquí no pretende ser más que un esquema verosímil.

quecido en ésteres de colesterol, lo extraen de la circulación receptores específicos que se encuentran exclusivamente en las células del hígado. El receptor específico para ese resto de quilomicrón no capta LDL y, por tanto, no participa en su eliminación del torrente sanguíneo.

LDL es, por consiguiente, un componente de la vía endógena, que comienza cuando el hígado segrega a la sangre una partícula de gran tamaño, la lipoproteína de muy baja densidad (VLDL, por *very-low-density lipoprotein*). El núcleo de esa partícula contiene en su mayor parte triglicéridos sintetizados en el hígado, junto con una menor cantidad de ésteres de colesterol; sobre su superficie despliega predominantemente dos proteínas, las apoproteínas *B*-100 y *E*, ambas con capacidad de unirse a los receptores de LDL. Cuando una partícula de VLDL llega a los capilares del tejido adiposo o del músculo, se extraen de ella los triglicéridos que transporta. Con ello se transforma en un nuevo tipo de partícula, de menor tamaño y enriquecida en ésteres de colesterol, y que retiene aún las dos apoproteínas; tal partícula recibe el nombre de lipoproteína de densidad intermedia, o IDL (por *intermediate-density lipoprotein*).

En el hombre, alrededor de la mitad de las partículas de IDL desaparecen de la circulación con gran rapidez (de dos a seis horas después de su formación), ya que se unen muy fuertemente a las células hepáticas, que extraen su colesterol para elaborar nuevas VLDL y ácidos biliares. Robert W. Mahley y Thomas L. Innerarity, de la Facultad de Medicina de la Universidad de California en San Francisco, han demostrado que esa unión tan fuerte es atribuible a la apoproteína *E*, cuya afinidad por el receptor de LDL de la célula hepática es más alta que la de la apoproteína *B*-100. Las partículas de IDL no capturadas por el hígado permanecen en la circulación mucho más tiempo. Dado un tiempo suficiente, la apoproteína *E* se disocia de ellas, transformándose las partículas en lipoproteínas de baja densidad (LDL); su único componente proteico es la apoproteína *B*-100. Puesto que la afinidad de la apoproteína *B*-100 por los receptores de LDL es menor, las partículas de LDL se mantienen en el torrente sanguíneo más tiempo que las partículas de IDL: permanecen en la circulación unos dos días y medio sin unirse a los receptores de LDL del hígado y otros tejidos.

El papel central del receptor de LDL en la aterosclerosis quedó patente al demostrarse que su ausencia era la causa de una grave enfermedad, la hipercolesterolemia familiar (HF). En 1939, Carl Müller, del Hospital Municipal de Oslo, identificó esa enfermedad como un defecto congénito del metabolismo; quienes la padecen presentan un nivel de colesterol sanguíneo muy elevado y sufren infartos de miocardio en edades muy tempranas. Estableció también que se transmite como rasgo dominante por un único gen. En la década de 1960, Avedis K. Khachadurian, de la Universidad Norteamericana de Beirut, y Donald S. Fredrickson, del Instituto Nacional del Corazón y del Pulmón de los Estados Unidos, reconocieron dos formas de esa enfermedad, una heterozigótica y otra, mucho más grave, homozigótica. Los heterozigotos que heredan un gen mutante son bastante frecuentes: alrededor de una persona de cada 500 en la mayoría de los grupos étnicos. Su nivel plasmático de LDL es doble del normal (incluso antes del nacimiento) y comienzan a padecer infartos hacia los 35 años; entre las personas que antes de los 60 años han sufrido un infarto de miocardio, una de cada 20 padece esa enfermedad en su forma heterozigótica.

Si dos heterozigotos HF se casan entre sí (uno de cada 250.000 matrimonios), sus hijos tendrán una probabilidad del 25 por ciento de heredar dos copias del gen mutante, una de cada uno de los padres. Esos homozigotos HF (aproximadamente uno por millón de personas) presentan un nivel de LDL circulante superior en más de seis veces al normal; sufren infartos de miocardio a partir de los dos años de edad y pocos superan los 20 años. Destaca el hecho de que esos niños no están expuestos a otros factores de riesgo que, según se sabe, favorecen el desarrollo de aterosclerosis, que el de tener elevado el nivel de LDL. Su presión sanguínea es normal, no fuman y sus valores de glucosa en sangre no están alterados. Lo cual demuestra de manera inequívoca la relación causal entre el nivel circulante de LDL y la aterosclerosis.

¿Qué induce esa elevación del nivel de LDL? ¿Cuál es la función concreta del gen mutante? Al examinar los cultivos de fibroblastos de la piel de homozigotos HF vimos que, o carecían totalmente de receptores funcionalmente activos, o éstos eran muy escasos, con lo que se obstaculizaba de manera importante la captación, introducción y degradación de la LDL. En otras palabras, el gen defectuoso codifica la proteína del receptor de la LDL. Los homozigotos que han heredado dos genes defectuosos no sintetizan receptores normales. Las células de los heterozigotos HF tienen un gen normal y otro mutante; sintetizan la mitad del número normal de receptores, con lo que su ritmo de captación, introducción y degradación de LDL también es un 50 por ciento del normal.

Todos los pacientes de HF estudiados hasta la fecha tienen mutaciones en el gen que codifica el receptor de LDL, pero esas mutaciones no son siempre las mismas. Según el lugar donde se haya registrado la mutación, puede ocurrir que ni siquiera se sinteticen receptores, que se elaboren pero no se transporten a la superficie celular o que sean incapaces de captar LDL o de acumularse en los hoyos revestidos.

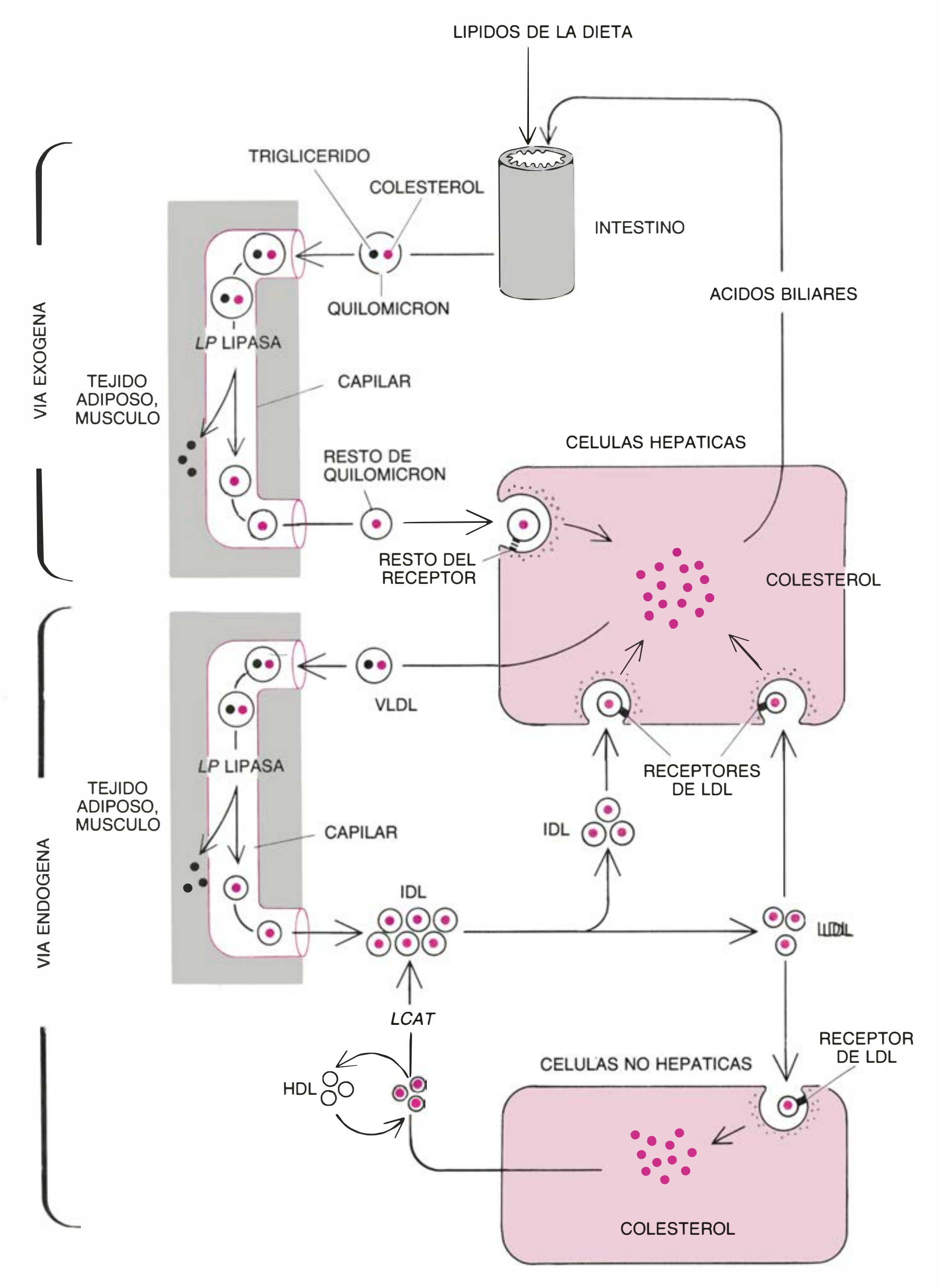
Estudios de LDL marcada con isótopos radiactivos han puesto de manifiesto que las partículas sobreviven en el torrente sanguíneo de los homozigotos HF durante un período de tiempo dos veces y medio más largo que el de los

sujetos con el gen normal para el receptor de LDL. (Tarde o temprano, la LDL acaba eliminándose de la circulación por otras vías alternativas, mucho menos eficaces.) El predecible retraso en la captación y degradación de LDL es la razón más importante para explicar el rasgo característico de la HF, esto es, su nivel tan extraordinariamente elevado, pero no lo explica totalmente. Además de degradar la LDL más lentamente, un homozigoto HF produce al día dos veces más LDL que una persona normal. ¿Cómo explicar que un defecto en el receptor de LDL promueva la producción excesiva de LDL? La respuesta se obtuvo en estudios de una cepa de conejos con un defecto genético semejante al de la HF en el hombre.

Yoshio Watanabe, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Kobe, descubrió, en 1978, esos conejos, a los que se denomina WHHL (por *Watanabe heritable hyperlipidemic*). Son homozigotos para un mutante del gen del receptor de LDL, y producen menos del 50 por ciento del número normal de receptores; tienen un nivel alto de LDL circulante ya desde el nacimiento y desarrollan una aterosclerosis que provoca infartos de miocardio hacia la edad de dos años. Estudios llevados a cabo por los autores en colaboración con Toru Kita y David W. Bilheimer, y por Steinberg y sus colaboradores, demuestran que los conejos, al igual que los homozigotos humanos HF, producen un exceso de LDL, a la vez que la degradan con extraordinaria lentitud.

Con objeto de esclarecer la razón de esa sobreproducción de LDL, Kita inyectó VLDL, la partícula precursora de LDL, marcada radiactivamente, en conejos WHHL y en animales normales, y siguió la radiactividad a través de la vía de transporte de lípidos. Descubrió que los triglicéridos desaparecían de las VLDL, transformándose en IDL, a un ritmo semejante en ambos grupos. En los conejos normales, la inmensa mayoría de las partículas IDL desaparecían rápidamente de la circulación uniéndose a los receptores de LDL de las células hepáticas. Sin embargo, en los conejos WHHL las células del hígado carecen de receptores de LDL, de ahí que se mantuviera en la circulación un número más elevado de partículas de IDL, que en última instancia se transformarían en partículas de LDL, también en una cuantía superior a la normal. En otras palabras, el descenso del número de receptores ejercía, en los conejos, dos efectos: un aumento de producción y un descenso de eliminación de LDL, que actuaban de modo sinérgico sobre el nivel de LDL, favoreciendo su aumento desproporcionado. Nicholas B. Myant y sus colaboradores, del Hospital Hammersmith de Londres, han demostrado que igual ocurre en los homozigotos HF.

La elucidación de la deficiencia del receptor HF sugirió un posible remedio para el gran número de pacientes afectos de la forma heterozigótica de la enfermedad. Tal vez pudiera lograrse la estimulación del gen normal del heterozigoto hasta que duplicara el ritmo de producción de receptores, dotando al paciente de una cantidad normal de re-



6. VIAS EXOGENA Y ENDOGENA DE TRANSPORTE DE LIPIDOS. El colesterol de la dieta se absorbe por la pared del intestino y se empaqueta en quilomicrones junto con triglicéridos (glicerol unido mediante enlace éster a tres ácidos grasos). La enzima lipoproteínlipasa (*LP*) hidroliza en los capilares del tejido adiposo y del músculo el enlace éster del triglicérido, liberándose los ácidos grasos. Cuando los restos del quilomicrón ricos en colesterol llegan al hígado se unen a receptores especializados que los transportan al interior de las células hepáticas. El colesterol se segrega luego al intestino (principalmente en forma de ácidos biliares), o se empaqueta junto con triglicéridos en las partículas de lipoproteína de muy baja densidad (VLDL), que entran en la circulación, iniciando la vía endógena. Los triglicéridos de las VLDL pasan también al tejido adiposo o al músculo, quedando la partícula convertida en lipoproteína de densidad intermedia (IDL), enriquecida en colesterol. Algunas de esas IDL se unen en el hígado a los receptores de LDL y se introducen rápidamente en las células hepáticas; las restantes permanecen en la circulación y se convierten en LDL. La mayor parte de las LDL abandonan la circulación uniéndose a receptores específicos del hígado o de otras células. El colesterol libre que pueda verterse desde las células a la circulación se une a las lipoproteínas de alta densidad (HDL) y lo esterifica la enzima *LCAT*. Los ésteres se transfieren a las IDL, y de éstas a las LDL, que tarde o temprano capturarán las células.

ceptores funcionales. La posibilidad de un tratamiento de este tipo se entrevió en las conclusiones extraídas de los cultivos de fibroblastos de la piel: la regulación de la síntesis del receptor se apoya en un mecanismo de retroinhibición en el nivel de la transcripción. El exceso de colesterol frena la transcripción del gen del receptor de LDL en su correspondiente ARN mensajero, ácido nucleico que subsiguientemente traduce en proteína del receptor la propia maquinaria celular; el descenso del colesterol estimula la transcripción, acelerándose así la producción de receptores. Descubrimos que si en cultivos de células de heterozigotos HF se reducía la concentración de colesterol del medio, las células elaboraban más moléculas de ARN mensajero a partir de su único gen del receptor, alcanzándose el número normal de receptores. ¿Cómo crear un déficit análogo de colesterol en los pacientes de HF?

El hígado capta y degrada más colesterol que ningún otro órgano, debido a su gran tamaño y a la elevada concentración de receptores de LDL que se da en él. Los ácidos biliares, en los que se convierte la mayor parte del colesterol, se segregan en los tramos superiores del intestino y allí emulsionan los lípidos de la dieta. Cumplida su función, los ácidos biliares no se eliminan por las heces, sino que en su mayor parte se reabsorben en el intestino, pasan a la circulación para ser capturados por el hígado y nuevamente se segregan al intestino. Tal reciclaje reduce ordinariamente las necesidades de colesterol por parte del hígado. Se nos ocurrió que, de interrumpirse el ciclo, el hígado se vería obligado a transformar más colesterol en ácidos biliares, lo cual forzaría a las células hepáticas a fabricar más receptores de LDL.

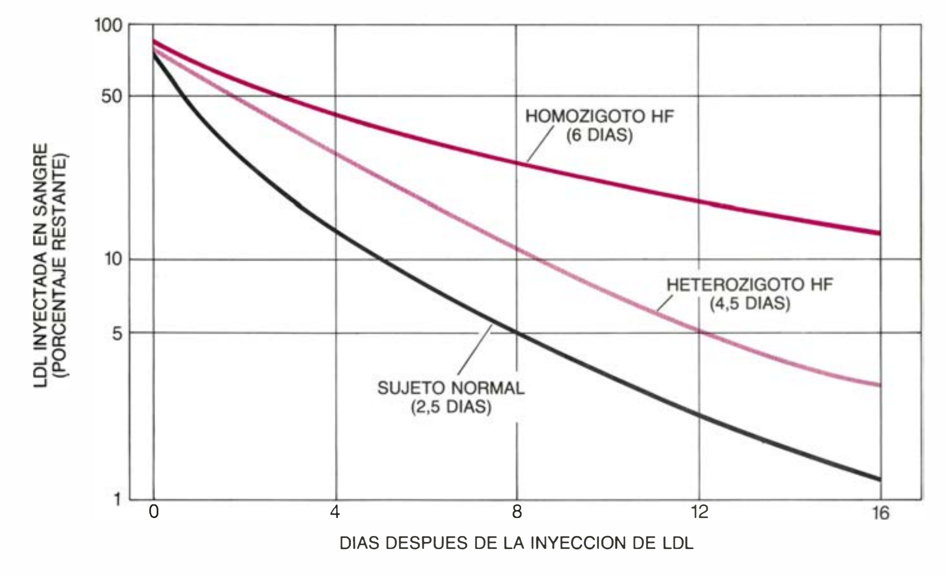
Se conocían ya fármacos que interrumpían el reciclaje de los ácidos biliares: resinas, polímeros con muchas cargas positivas capaces de unir ácidos biliares. Administradas por vía oral, esas resinas se unen, en el intestino, a las cargas negativas de los ácidos biliares y, puesto que las resinas no las absorbe el intestino, se excretan, arrastrando consigo los ácidos biliares. La primera resina con capacidad para unir ácidos biliares, la colestiramina, se sintetizó hace más de 20 años. Se comprobó que provocaba un descenso del nivel sanguíneo de LDL de un 10 por ciento, por término medio. (En un reciente estudio prospectivo realizado por el Instituto Nacional del Corazón, del Pulmón y de la Sangre se señalaba que ese descenso bastaría para reducir en un 20 por ciento la incidencia de infartos de miocardio en un grupo de hombres de mediana edad.) Los nuevos datos sobre el metabolismo de la LDL nos proporcionaban la clave para interpretar cabalmente los resultados obtenidos: la interrupción del reciclaje de los ácidos biliares provocaba un aumento del número de receptores de LDL en las células del hígado.

El descenso del 10 por ciento del nivel de LDL que lograba la colestiramina y otras resinas abría un panorama optimista, pero resultaba escaso para tratar los heterozigotos HF. La limitada eficacia de las resinas se debía a que el hígado, además de aumentar la producción de receptores de LDL, respondía con un incremento de la síntesis de HMG CoA reductasa para aumentar la propia producción de colesterol. Ese aumento de la síntesis *de novo* de colesterol, razonamos, satisfaría parcialmente las necesidades de colesterol, permitiendo al hígado detener la producción de receptores de LDL antes de alcanzarse su valor máximo.

Se nos ocurrió que la inhibición de la síntesis de colesterol forzaría al hígado a depender más de la captación de LDL, estimulándose con ello la producción de receptores. Para detener la síntesis de colesterol nos aprovechamos de un descubrimiento de Akira Endo, en la actualidad en la Universidad de Agricultura y Tecnología de Tokio: un inhibidor natural de la HMG CoA reductasa. En 1976 había aislado del moho de la penicilina una sustancia llamada compactina. Una cadena lateral de esa molécula guarda un gran parecido con la estructura del sustrato natural de la HMG CoA reductasa; al unirse al centro activo de la enzima, inhibe su actividad. Alfred W. Alberts, de los laboratorios de investigación de la Merck Sharp & Dohme, y sus colaboradores aislaron a partir de un moho distinto otra sustancia emparentada estructuralmente con la compactina, la mevinolina, inhibidor aún más potente de la enzima. Endo y Alberts demostraron, respectivamente, que tanto la compactina como la mevinolina reducen el nivel sanguíneo de LDL en animales. De ser correcto nuestro planteamiento, esos fármacos habrían de ser más eficaces aún al administrarlos en conjunción con una resina captadora de ácidos biliares.

En colaboración con Petri T. Kovanen administramos a perros una resina captadora de ácidos biliares aislada o con uno de los inhibidores enzimáticos. Al cabo de dos semanas determinamos el número de receptores de LDL midiendo la capacidad de captación de LDL radiactiva por parte de las membranas de células hepáticas obtenidas por biopsia. Como era de esperar, la resina sola había provocado una elevación moderada del número de receptores. Cuando se administraba junto con el inhibidor de la enzima, la elevación del número de receptores era mucho más ostensible. La asociación incrementó de modo notable, en todo el organismo, el ritmo de desaparición de la LDL circulante. En los perros se observaron descensos del 75 por ciento en el nivel de LDL.

Con Bilheimer y Scott M. Grundy procedimos a administrar una resina y



7. NUMERO DE RECEPTORES DE LDL. Se ha calculado por inyección de LDL marcada con un isótopo radiactivo y estimación de la radiactividad de la sangre en el transcurso de varias semanas; la pérdida de radiactividad refleja la captación y, por tanto, el número de receptores de LDL. Las curvas representan la desaparición de LDL en sujetos normales y en pacientes con las formas homozigótica y heterozigótica de hipercolesterolemia familiar (HF). Entre paréntesis, la vida media de las partículas.

1 IDL Y LDL CIRCULANTES

2

HMG CoA

HMG CoA REDUCTASA

INHIBICION

ACIDO MEVALONICO

COLESTEROL

ACIDOS BILIARES

ACIDO QUENO-DESOXICOLICO (R= H)

ACIDO COLICO (R= OH)

COMPACTINA (R= H)

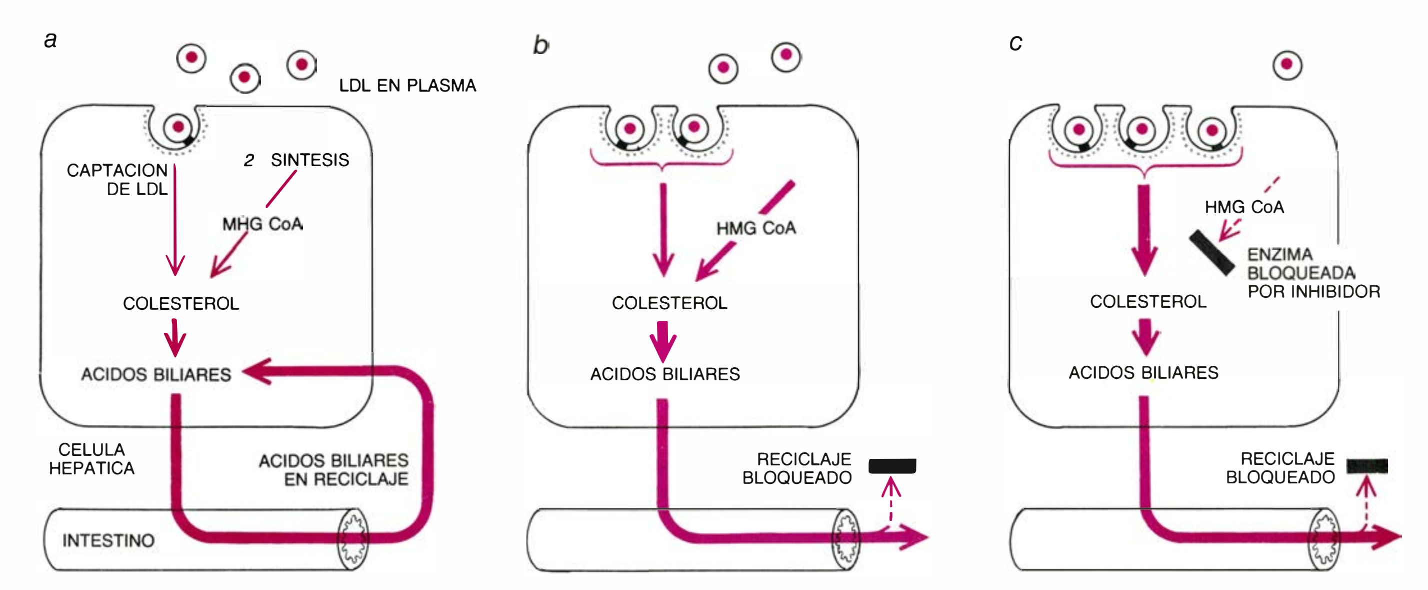
MEVINOLINA (R= CH_3)

8. EL HIGADO OBTIENE COLESTEROL, para su conversión en ácidos biliares, de las IDL y LDL capturadas a la sangre circulante (*1*), o por síntesis de novo (*2*). Un paso fundamental en la larga vía de síntesis es la reducción del HMG CoA a ácido mevalónico, reacción catalizada por la enzima HMG CoA reductasa. Puede inhibirse esa enzima con los fármacos compactina o mevinolina, cuyas cadenas laterales son tan semejantes a las del HMG CoA (*enmarcadas en color*) que bloquean el centro activo de la enzima. La inhibición de esta enzima obliga al hígado a depender de la captación de IDL y LDL.

la mevinolina en pacientes heterozigotos HF. Sus niveles de LDL descendieron aproximadamente en un 50 por ciento, colocándose dentro de los valores normales. Pruebas realizadas con LDL radiactiva mostraron que el descenso respondía a un aumento de los receptores de LDL. Se había forzado al único gen normal a trabajar a un ritmo doble, produciéndose suficientes receptores para permitir la captación de LDL circulante con un ritmo normal.

Como era de suponer, los homozigotos HF, que carecen totalmente de genes normales para el receptor, no responden a este tratamiento conjunto con los dos fármacos. Su ayuda habrá de proceder de otros caminos. Thomas E. Starzl, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Pittsburgh, ha intentado un tratamiento quirúrgico, al sugerirse que la carencia de receptores podría corregirse parcialmente si al enfermo se le trasplantase el hígado de un donante normal. Con este planteamiento realizó el trasplante de hígado de un niño muerto en accidente a una niña de seis años con la forma grave, homozigótica, de HF. (La paciente había sufrido ya varios infartos de miocardio y su corazón estaba tan débil que fue necesario hacerle también un trasplante cardiaco.) Seis meses después de la operación, la paciente mantenía un nivel de colesterol total de alrededor de 300 miligramos por decilitro, cuando el nivel preoperatorio había sido de 1200. Es obvio que un trasplante no es el tratamiento ideal, pero hasta la fecha los resultados muestran que los receptores de las células del hígado trasplantado siguen funcionando y eliminan la LDL de la circulación.

¿Qué decir de la enorme cantidad de personas que en las sociedades industrializadas de Occidente, y sin defecto genético del receptor de LDL, sufren infartos de miocardio o apoplejía? ¿Tiene algún relieve lo que ahora sabemos sobre la HF en relación con la elevada incidencia de aterosclerosis en la población general? Creemos que así es. La hipótesis del receptor de LDL establece que, en buena parte, la aterosclerosis de la población general está causada por un nivel peligrosamente elevado de LDL, que es, a su vez, resultado de un fallo de la producción de receptores de LDL. El número inadecuado de receptores puede atribuirse a sutiles factores genéticos y ambientales que limitan la producción de receptores. Un factor ambiental es, por ejemplo, una dieta rica en colesterol y en grasas saturadas de origen animal.



9. LA FORMA HETEROZIGOTICA DE HF puede tratarse mediante una combinación de fármacos que estimulan la producción de receptores de LDL. De ordinario, la demanda de colesterol por parte del hígado se modifica por la recirculación de los ácidos biliares (*a*). Si se bloquea ese ciclo con una resina captadora de ácidos biliares (*b*), crece la demanda de colesterol. Las células del hígado responden aumentando el número de receptores de LDL y potenciando la tasa de síntesis de colesterol. Si se administra un segundo fármaco para frenar el aumento de la síntesis (*c*), se expondrán más receptores.

Los estudios epidemiológicos realizados en muchos países en estos últimos 30 años han puesto de manifiesto, y con bastante uniformidad, que la incidencia de aterosclerosis es más grave cuando el nivel medio de LDL de la población se eleva. Ya en 1958, Ancel Keys, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Minnesota, estudió grupos de población de siete países en los que el nivel medio de colesterol total iba, desde el valor máximo de 265 miligramos por decilitro, hasta el mínimo de 160. (No estudió concretamente el colesterol ligado a la LDL; sin embargo, puesto que el nivel de las lipoproteínas, LDL aparte, no varía mucho, se admite que las variaciones del colesterol total reflejan diferencias en los niveles de LDL.) Keys registró los niveles de 12.763 hombres, de edades semejantes, de esos siete países; 10 años después hizo el recuento de los que habían sufrido un infarto de miocardio.

De ese estudio se dedujo una estrecha correlación entre el nivel de colesterol y las siguientes variables: la incidencia de aterosclerosis coronaria (medida por el número de muertes debidas a infarto de miocardio) y la dieta rica en grasa animal. En dos ciudades pequeñas (una de Japón y otra de Yugoslavia), donde el nivel medio de colesterol era de 160, la incidencia de infarto de miocardio fatal fue inferior al 5 por 1000 hombres en 10 años. En la zona oriental de Finlandia, donde el nivel medio de colesterol era de 265, la incidencia de ataques de corazón fatales fue 14 veces mayor. En poblaciones con niveles intermedios de colesterol la incidencia arrojó también un valor intermedio.

La correlación entre el nivel de colesterol y la dieta rica en grasas animales fue aún más estrecha que la observada entre colesterol y aterosclerosis. En poblaciones donde el consumo de grasa animal es más limitado (como en Japón y Yugoslavia) los niveles de colesterol eran bajos. Poblaciones con un consumo elevado de tales grasas (como la zona oriental de Finlandia) mostraban niveles elevados. Estudios posteriores a los de Keys, efectuados en todo tipo de poblaciones, han confirmado sus hallazgos: niveles altos de LDL constituyen la regla general en poblaciones cuyo aporte calórico se basa en gran parte en el consumo de grasas de productos cárnicos y de productos lácteos.

La hipótesis del receptor de LDL proporciona una explicación razonable de los datos epidemiológicos. Una ingestión elevada de colesterol favorece que el colesterol se acumule en las células hepáticas. La acumulación parece acentuarse con la ingestión de grasas de procedencia animal ricas en ácidos grasos saturados. Incluso una acumulación moderada de colesterol en el hígado detendría parcialmente la producción de receptores de LDL, lo cual podría conducir a un aumento del nivel medio de LDL, perceptible en el conjunto de la población.

Experimentos con animales, realizados por nuestro grupo y por Mahley e Innenarity, apoyan la hipótesis de que una dieta rica en grasas reduce el número de receptores del hígado. En babuinos, conejos y perros mantenidos con dietas pobres en grasas el número de receptores de LDL es alto; los animales degradan la LDL rápidamente. Sus niveles de LDL son bastante inferiores a los que se dan en el hombre. Si los conejos y los perros se alimentan con dietas de elevado contenido en colesterol, la producción de receptores se suprime en el hígado hasta en un 90 por ciento, circunstancia que lleva a la acumulación de IDL y LDL en la sangre. Al nacer, el niño tiene concentraciones bajas de LDL, comparables a las de otras especies animales; según parece, el recién nacido posee un gran número de receptores de LDL. En las sociedades industrializadas, el nivel de LDL se eleva unas tres o cuatro veces durante la niñez y adolescencia. De los estudios realizados con LDL inyectada en adultos se desprende que su aumento cabe atribuirlo a un descenso, con la edad, del número de receptores.

No conocemos todas las causas que conducen al déficit adquirido de receptores en el hombre. Un factor importante parece ser la ingestión de cantida-

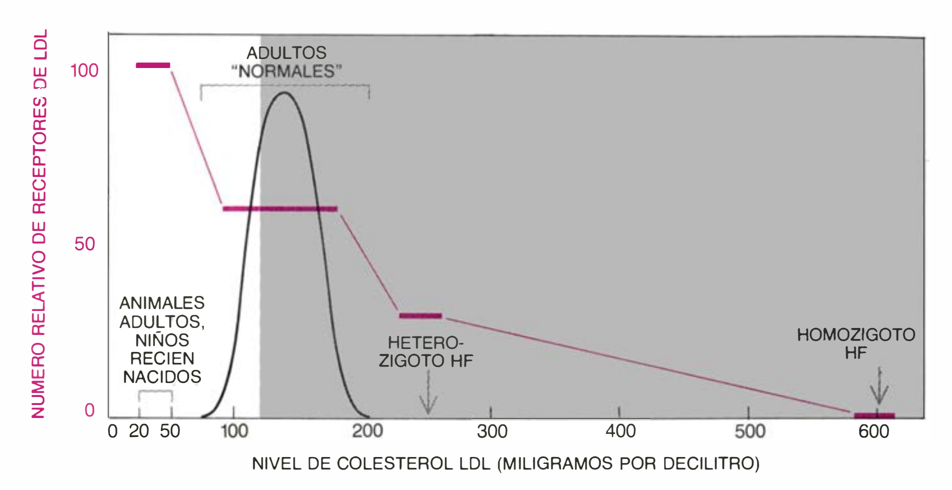
10. DEFICIT DEL RECEPTOR DE LDL, que puede ser de carácter genético o adquirido. Ejerce dos efectos sinérgicos que, combinados, provocan la elevación de los niveles sanguíneos de LDL. La VLDL segregada por el hígado se convierte en IDL en el tejido adiposo y en el músculo. En un sujeto normal, alrededor de la mitad de las partículas de IDL las capturan los receptores de LDL de las células hepáticas; el resto se convierte en LDL (*arriba*). En la HF (*centro*), un defecto genético reduce el número de receptores de las células del hígado; déficit análogo se produce con dietas que aportan mucho colesterol a las células hepáticas, que responden frenando la síntesis de receptores. Los resultados son, en ambos casos, los mismos. La IDL que no captan las células del hígado permanece en la circulación y se transforma en LDL, cuyo nivel en sangre aumenta, pues se elimina del torrente sanguíneo más lentamente que aquélla.

des elevadas de grasas animales; pero éste no es el único factor, pues en personas que siguen dietas de contenido muy bajo en grasa el nivel de LDL tiende a ser más alto que en otras especies. Las hormonas del tipo del estradiol y la tiroidea estimulan la producción de receptores de LDL en el hígado, y es muy posible que algunos trastornos de éstas u otras hormonas contribuyan al descenso del número de receptores dependiente de la edad.

Según indican los datos epidemiológicos, las concentraciones de LDL que llegan a alcanzarse en la mayoría de los adultos de mediana edad de Occidente siguen una relación estrecha con la aterosclerosis precoz. Los experimentos con cultivos celulares nos ofrecen el porqué. La concentración óptima a que debe hallarse la LDL en la sangre, para que los receptores la capten, se sitúa por debajo de los 50 miligramos por decilitro. Se diría que los receptores, tanto en animales como en el hombre (a juzgar por el nivel de LDL en niños de poca edad), han sido seleccionados por la evolución para operar precisamente en esos niveles. Sin embargo, en los países industrializados de Occidente, el nivel medio "normal" ronda los 125 miligramos por decilitro, valor que queda muy por encima de la concentración ante la cual los receptores captan la LDL con máxima eficacia.

William R. Hazzard y sus colaboradores, del Hospital Johns Hopkins, han publicado un hallazgo congruente con la hipótesis del receptor de LDL. Subrayan que en los adultos que ingieren una dieta rica en colesterol (en la que se incluyen tres yemas de huevo al día) se produce un descenso del número de receptores de LDL, que midieron de manera directa en linfocitos circulantes. La prueba definitiva de la hipótesis requerirá, sin embargo, un estudio amplio y con controles estrictos de los ritmos con que se metabolizan las VLDL y LDL tras inyección en miembros de poblaciones con dietas pobres y dietas ricas en lípidos y con niveles distintos de LDL.

Si la hipótesis del receptor se demuestra correcta, el sistema del receptor en el hombre está diseñado para funcionar en presencia de un nivel de LDL extraordinariamente bajo. La dieta necesaria para mantener ese nivel ha de ser muy distinta de la habitual en los países industrializados de Occidente (y más estricta aún que las dietas moderadamente bajas en colesterol recomendadas por la Asociación Americana del Corazón). Esa dieta exigiría la eliminación de productos lácteos y de huevos, y una limitación bastante amplia de la ingestión de carne y de otros alimentos ricos en grasas saturadas.



11. MARGEN DE NIVELES DE LDL en sujetos normales de las sociedades industrializadas (*curva*), comparados con el margen dentro del que se encuentran los niveles en animales adultos y niños recién nacidos y con el correspondiente a pacientes de HF. Los niveles situados en la zona sombreada de la gráfica quedan por encima del umbral crítico asociado a la aterosclerosis precoz; más de la mitad de los adultos tienen un nivel de LDL superior a ese umbral. Entre el nivel de LDL y el número de receptores de LDL (*color*) se aprecia una relación inversa, esto es, crece la concentración al disminuir los receptores.

A nuestro entender, no se justificaría un cambio tan radical de hábitos alimentarios en toda la población. Y por varios motivos. Primero, tendría graves consecuencias económicas y sociales. Segundo, expondría la población a otras enfermedades para las que ahora estamos protegidos por una moderada ingestión de grasas. Tercero, la experiencia demuestra que la mayoría de la gente se resiste a aceptar voluntariamente una dieta extremadamente baja en grasas. Cuarto, y el argumento de más peso, la gran variedad genética que se da entre los individuos. De todos los que consumen la típica dieta de las sociedades industriales de Occidente, con un contenido muy elevado en grasas, sólo el 50 por ciento morirá de aterosclerosis; la otra mitad es resistente a la enfermedad.

Algunos individuos son resistentes a la aterosclerosis porque su nivel de LDL no se eleva de modo peligroso aunque consuman una dieta rica en grasa; quizá hayan heredado genes que, de alguna manera, salvan el sistema de retroinhibición usual y mantienen la producción de receptores en el nivel adecuado. Barbara V. Howard, del Centro de Investigación Clínica del Instituto Nacional de la Salud de Phoenix, ha demostrado que los indios de la tribu Pima tienen un número de receptores de LDL bastante elevado y mantienen niveles bajos de LDL pese a consumir una dieta rica en grasa. En otros individuos, sus arterias parecen resistir los efectos perjudiciales de una concentración elevada de LDL. Por ejemplo, el 20 por ciento de los hombres con HF en su forma heterozigótica no sufren ningún infarto de miocardio antes de los 60 años, aunque su nivel sanguíneo de LDL es muy alto.

¿Qué medidas pueden tomarse, por tanto, para prevenir la aterosclerosis precoz? Una sería individualizar las recomendaciones dietéticas. Una dieta de contenido moderado en grasa parece lo aconsejable para la mayoría de la gente. La dieta que propone la Asociación Americana del Corazón, por ejemplo, reduciría los niveles del colesterol sanguíneo en un 15 por ciento; algo rebajaría la incidencia del infarto de miocardio. Por otra parte, las personas con una historia familiar de infartos o de apoplejías frecuentes, que quizá resulten especialmente susceptibles a los efectos perjudiciales de la LDL, habrían de seguir dietas de contenido extremadamente bajo en colesterol y en lípidos saturados, y ello aun cuando su nivel de LDL fuera cercano al nivel medio "normal". Cabe también esperar que futuras investigaciones identifiquen los factores que sensibilizan a los efectos deletéreos de la LDL o que protegen de esos efectos.

Finalmente, la terapéutica con fármacos que aumenten el número de receptores de LDL puede resultar apropiada en aquellas personas que, sin padecer de HF, tengan un número bajo de receptores, ya sea por efecto de la dieta o de otros factores. Si se demuestra que tales fármacos evitan la supresión de los receptores inducida por la dieta, y que además son inocuos en su uso prolongado, quizá llegue el tiempo en que pueda la gente comerse a diario un buen bistec y vivir para contarlo.

Ciencia y sociedad

Ciencia y arte: Juan Bautista Bru (1740-1799)

En el capítulo sobre paleontología de los vertebrados de la *Histoire Générale des Sciences* dirigida por René Taton, Jean Piveteau ofrece la siguiente noticia: "El año 1789 fue montado en Madrid por Juan Bautista Bru, disector del Real Gabinete, el primer esqueleto de *Megatherium* y al mismo tiempo el primer esqueleto de mamífero fósil". Es una de las escasas contribuciones españolas mencionadas en los volúmenes sobre la ciencia contemporánea de este conocido tratado, lo que podría hacer pensar que las obras de consulta españolas proporcionan información accesible y detallada acerca de Bru y su labor, así como que existen estudios monográficos en torno al tema. Sin embargo, no es así. El nombre de Juan Bautista Bru solamente aparece en un número muy limitado de repertorios y trabajos eruditos, cuyas sucintas menciones no tienen, además, relación con la cuestión del montaje del esqueleto de megaterio. Por otra parte, no se le ha dedicado hasta ahora ningún trabajo monográfico. El presente artículo intenta dar a conocer la personalidad de Bru y su labor científica, en especial sus contribuciones al grabado zoológico y a la descripción del género fósil *Megatherium*.

Juan Bautista Bru de Ramón nació el año 1740 en la ciudad de Valencia, donde discurrió su infancia, adolescencia y juventud. Es probable, aunque carecemos de pruebas, que fuera pariente del pintor y escultor Francisco Bru y de su hermano el grabador Manuel Bru, ambos coetáneos suyos que desarrollaron su actividad en Valencia. En cualquier caso, "desde niño se dedicó al dibujo y pintura", aunque como artista solamente llegó a ser una medianía. Dejando aparte su labor relacionada con la zoología, conocemos únicamente dos obras suyas: unos frescos en la iglesia de Nuestra Señora del Rosario, en El Grao de Valencia, que al parecer pintó en su juventud, y una colección de treinta y dos láminas "que representan los trages de las Naciones Asiáticas", que publicó ya de edad madura (Palau Dulcet). En 1771, cuando tenía por lo tanto poco más de treinta años, Bru fue nombrado "pintor y primer disecador" del Real Gabinete de Historia Natural, de Madrid. Ocupó ese cargo hasta su fallecimiento el 12 de diciembre de 1799, consagrándose durante las tres décadas a su trabajo en dicha institución.

El Real Gabinete de Historia Natural había sido fundado por Fernando VI en 1753, a propuesta del gran naturalista Antonio de Ulloa, quien fue su primer director. Sin embargo, requerido por otras tareas, Ulloa dejó este puesto dos años más tarde y la nueva institución, privada de su prestigio, no prosperó, a pesar de los esfuerzos de su sucesor, Eugenio Reigosa. Varios intentos de convertir al Gabinete en un centro importante culminaron en 1771, principalmente por iniciativa de Enrique Flórez –generalmente recordado por su obra de historiador, pero también un notable naturalista–, quien consiguió que Carlos III y el conde de Aranda, entonces presidente del Consejo de Castilla, apoyasen seriamente el proyecto. En octubre del citado año se adquirieron las grandes colecciones de historia natural americana que durante un cuarto de siglo había reunido el peruano Pedro Franco Dávila.

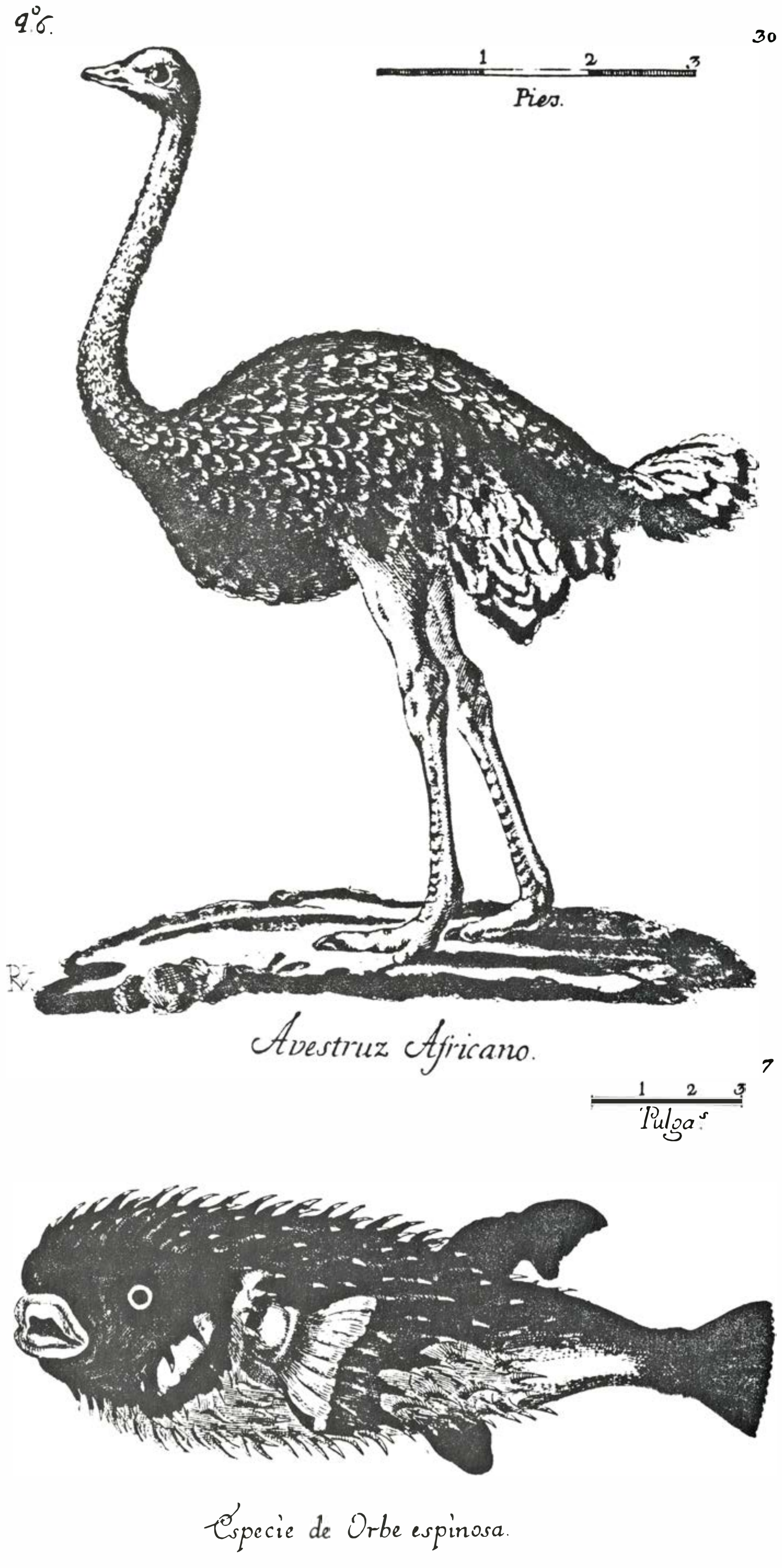
Unidas a los materiales ya existentes y a otros de diversa procedencia, entre ellos algunos de los reunidos en la expedición científica española a la Guayana de 1754, se instalaron en los nuevos locales del Real Gabinete, situados en el mismo edificio de la calle de Alcalá que la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando; por ello, se puso en el frontispicio la inscripción que todavía hoy existe: "Carolus III Rex naturam et artem sub uno tecto in publicam utilitatem consociavit". Al inaugurarse las nuevas instalaciones, las colecciones se ordenaron en ocho salas, que se abrieron a la visita del público los lunes y los jueves de cada semana. El personal del Gabinete estaba entonces encabezado por un director –cargo que desempeñaba el propio Franco Dávila–, un vicedirector y un bibliotecario. Este último puesto lo ocupaba el canario José Clavijo Fajardo (1730-1806), quien pasó a vicedirector tras el fallecimiento de Franco Dávila en 1786 y fue la personalidad más activa y el principal gestor de la institución durante las tres décadas en las que Bru trabajó en ella. El cargo que ocupaba el artista valenciano era el cuarto en categoría del Real Gabinete y asociaba dos funciones importantes: la de "pintor y dibujante" especializado, de gran relieve en los centros y expediciones científicas de la época, y la de "disecador", que incluía tanto las tareas propias de zootomista o disector como las de taxidermista. El Gabinete contaba, además, con otro "disecador", un "lapidario", un conserje y varios subalternos.

A lo largo del cuarto siglo siguiente, el Gabinete enriqueció de modo extraordinario sus colecciones, convirtiéndose en uno de los centros más importantes de Europa en su género. Una disposición real de 1771 había ordenado a las autoridades de la metrópoli y de las colonias que organizaran la recogida y el envío de materiales correspondientes a la historia natural de cada zona. Naturalistas, aficionados y autoridades remitieron de forma ininterrumpida animales y minerales de la Península Ibérica y de las Islas Baleares y Canarias. La reunión de productos naturales de América y el Pacífico se vio favorecida por el hecho de que tuvieran lugar en este período las grandes expediciones científicas españolas, en especial, la de México (1787-1802), dirigida por Martín de Sessé, la de Nueva Granada (1782-1808), encabezada por José Celestino Mutis, la de Perú y Chile (1777-1788), a cargo de Hipólito Ruiz y José Antonio Pavón, así como el viaje por Sudamérica, la costa occidental y el Pacífico de las corbetas "Descubierta" y "Atrevida" (1789-1795), que capitaneó Alejandro Malaspina y cuyo naturalista jefe fue Antonio Pineda.

Los herbarios, semillas, maderas, vegetales vivos y dibujos de plantas procedentes de estas expediciones eran entregados al Jardín Botánico, de Madrid, y los materiales zoológicos, geológicos y mineralógicos, al Real Gabinete de Historia Natural. Este contó, además, con "colectores" propios que trabajaron tanto en la metrópoli como en las colonias. Algunos de ellos fueron figuras notables, como Juan de Cuéllar –cuya actividad se desarrolló en Filipinas– o los geólogos Cristiano Herrgen y Carles de Gimbernat; también la expedición científica a América dirigida por los hermanos Cristiano y Conrado Heuland (1794-1796) consistió fundamentalmente en un viaje de recolección de materiales para el Gabinete. Otra fuente de ejemplares americanos fue la continua serie de remesas que hacían los virreyes en cumplimiento de la disposición real antes citada. Se encontraban en ellas, como es lógico, muchos objetos sin interés o puramente pintorescos, pero también numerosos materiales de importancia. Por ejemplo, a la iniciativa del virrey del Río del Plata,

marqués de Loreto, se debieron, en 1789, dos envíos de gran relieve. Uno de ellos fue una colección de aves de aquel territorio, reunida por Félix de Azara y acompañada del manuscrito de la primera versión de sus célebres *Apuntaciones para la historia natural de las aves del Paraguay* y de un *Indice* de setenta y cuatro páginas "de las aves contenidas en la botijada". El otro, el esqueleto de un megaterio que, como veremos, montó poco después Bru. Por otra parte, el Gabinete compró durante esta época ejemplares o colecciones completas en distintos países europeos e intercambió materiales con otras instituciones semejantes. No resulta extraño que los locales de la calle de Alcalá resultaran insuficientes, por lo que, en 1785, se dispuso la construcción de un gran edificio en el actual paseo del Prado, junto al Jardín Botánico y el Observatorio Astronómico; como es sabido, el colapso de la actividad científica española durante el reinado de Fernando VII hizo que este edificio acabara destinado a museo de pintura y escultura. Anotemos, por último, que el Gabinete se convirtió en un centro de enseñanza e investigación, editando la revista *Anales de Historia Natural*, que comenzó a publicarse en 1799.

El trabajo de Bru en el Real Gabinete, a lo largo de treinta años, estuvo exclusivamente consagrado al campo de la zoología, concretamente a los vertebrados, sin relación alguna con la mineralogía ni tampoco con las importantes colecciones entomológicas y malacológicas que tenía la institución. Como "pintor", se dedicó fundamentalmente a dibujar los ejemplares de vertebrados disecados o conservados en alcohol y los esqueletos que existían en el Gabinete y, de forma secundaria, a copiar grabados, pinturas y dibujos de animales. Por otra parte, también se encargó, como veremos, de confeccionar los grabados de una obra zoológica a partir de los dibujos y borradores originales: la *Colección de producciones de los mares de España*, de Antonio Sáñez Reguart. Como "disecador", su tarea consistía, por una parte, en la preparación de ejemplares disecados y el montaje de esqueletos; por otra, en la conservación de los materiales zoológicos que, procedentes de las expediciones, los "colectores" y las donaciones llegaban al Gabinete. Buena parte de su actividad de taxidermista la realizó con ejemplares procedentes de la "casa de fieras", de los jardines del Retiro y de las colecciones de animales exóticos vivos existentes en otros sitios reales, como Aranjuez, la Casa de



*1 y 2. "Avestruz africano" (***Struthio camelus** *L.) y "Orbe espinosa" (***Diodon hystrix** *L.), dos de las láminas, dibujadas y grabadas por Juan Bautista Bru, que figuran en su atlas sobre las piezas zoológicas del Real Gabinete de Historia Natural, de Madrid (1784-1786)*

Campo y La Granja. De esta forma, entre las preparaciones que había hecho, el propio Bru destacó, junto a las de especies propias de la fauna ibérica, las de animales como el reno de Laponia, la "chota beta" de Java, el zopilote mexicano y otras aves americanas, el avestruz y el león africano, etc. Los esqueletos, en algunos casos, los preparaba y montaba a partir del cadáver de un animal, como hizo, por ejemplo, con el de un elefante muerto en 1777 en el Real Sitio de Aranjuez; en otras ocasiones, se trataba de identificar unos huesos que habían llegado al Gabinete y reconstruir después el esqueleto.

En cuanto a la labor de conservación de los ejemplares enviados a la institución, baste decir que era muy compleja y llena de dificultades. Procedentes de las expediciones científicas y de los naturalistas que trabajaban en América o el Pacífico, llegaban a veces vertebrados bien disecados, como las ochenta aves y los dieciséis "cuadrúpedos" de Perú y Chile remitidos en 1789 por Ruiz y Pavón, mientras que otras se perdía completamente un material importante, tal como sucedió con las sesenta aves mexicanas enviadas en 1794 por la expedición dirigida por Martín Sessé, debido "a ser sus armazones de goma de limón"; había ocasiones en que los ejemplares se recibían en "botijas" o frascos con alcohol, como fue el caso de las aves de Azara, y era frecuente la recepción de pieles, plumas y huesos no siempre en buen estado.

Tenemos múltiples testimonios de que Bru se esforzó en prácticamente todas las vertientes de esta compleja serie de funciones. Hay que subrayar, sin embargo, que no se limitó a un papel de mero técnico, sino que llegó a adquirir formación científica como naturalista. Estuvo familiarizado con la literatura zoológica y, en general, sobre historia natural publicada en castellano, latín y francés desde el Renacimiento hasta su propia época. Ello le permitió confeccionar su obra *Colección de láminas que representan los animales y monstruos del Real Gabinete de Historia Natural de Madrid* (1784-1786), de la que a continuación nos ocuparemos. De modo especial se preocupó de sus conocimientos sobre anatomía comparada, llegando a escribir varias "disertaciones" morfológicas, la más importante de las cuales fue la que dedicó al megaterio. Ese nivel científico de Bru apenas debió tener otra compensación moral que su condición de "socio de mérito" de la Real Sociedad Matritense de Amigos del País, de la que da noticia en la portada de su obra recién citada. En cambio, no se sintió satisfecho ni con su salario ni con su cargo en el Real Gabinete. Pidió varias veces que le subieran el sueldo, que era casi la mitad del de Clavijo, con la aprobación de éste. En 1793, cuanto tenía como "ayudante de disector" a su pariente Mariano Bru, solicitó que se le nombrara "teniente-director del Real Gabinete"; esta vez no contó con la aprobación de Clavijo, quien consideró la petición infundada, aunque la disculpó como propia del "carácter inquieto" de su autor.

La primera publicación del Real Gabinete fue la obra de Bru que acabamos de citar, cuyo título completo es *Colección de láminas que representan los animales y monstruos del Real Gabinete de Historia Natural de Madrid, con una descripción individual de cada uno*. Se trata de un atlas que apareció en cuadernos mensuales que, reunidos, formaron dos volúmenes, el primero de los cuales (1784) incluye treinta y cinco láminas y el segundo (1786), treinta y seis. Los grabados son calcografías de 15 × 20,5 cm coloreadas a mano en los ejemplares conocidos. Cada una lleva escala en pulgadas y va acompañada a una "descripción" del animal representado de una extensión que oscila entre una y dos páginas. Todas llevan la firma de Bru, quien hizo los dibujos y los grabados y redactó los textos.

El primer volumen se inicia con una dedicatoria al conde de Floridablanca, en la que Bru menciona expresamente como objetivos de su política ilustrada la "utilidad" y la "felicidad de los vasallos de Su Majestad", dentro de los cuales encuadra "la presente obra que, al paso que facilita la instrucción a los que frecuentan este Real Gabinete, la proporciona a todo el Reino". Sigue un prólogo en el que principalmente insiste en la objetividad de sus láminas, contraponiéndola a la inexactitud o ambigüedad de las descripciones de "la mayor parte de los autores antiguos, que sólo han escrito sobre lo que han oído". Para ello, afirma, "me he valido de los (animales) que tenemos en este Real Gabinete, copiando finalmente del original los colores, la magnitud y dimensiones, que el lector podrá reconocer midiéndolas por el pitipié que lleva cada lámina". La finalidad de la obra es, por supuesto, "hacer conocer al público las cosas como se ven en este Real Gabinete" y a ella se debe que esté "hecha con la mayor sencillez y brevedad". En aras de la concisión, asegura haber resumido al máximo las descripciones de los animales "comunes" –siendo más detallado en las de los "raros que vienen de países extranjeros"– y también no haber "querido tratar de anatomía por no abultar la obra".

En realidad, Bru hizo algunas excepciones a esta norma de no incluir estudios anatómicos. Aunque de forma sumaria, describió los detalles morfológicos que había encontrado al disecar los cinco "monstruos" que figura en la *Colección*: un pollo, una liebre, dos terneras y un lagarto con alteraciones teratológicas. En la explicación de las láminas del elefante y del "esqueleto del elefante de ocho pies y medio de alto... (que) armé y disequé el año de 1777" incluyó una descripción anatómica de cierta extensión. Asimismo, al ocuparse de una "especie de orbe espinosa" que consideraba no coincidía con ninguno de los peces descritos por los tratadistas de ictiología, afirmó que había estudiado su anatomía –"trabajé sobre su estructura una disertación anatómica"–, de la que ofreció un breve resumen.

"A cada animal he puesto la nomenclatura de los autores más famosos, sin olvidarme de los célebres Linneo y Buffon... He procurado también conservar en muchos el nombre provincial", adelantaba Bru en su prólogo. En la práctica, utilizó como fundamento taxonómico de cada especie descrita la décimotercera edición del *Systema Naturae* (1767-70), de Linneo. La *Historia naturelle*, de Buffon, cuya traducción castellana había publicado Clavijo, fue solamente una de las obras más mencionadas, junto a otros tratados, atlas y monografías también de autores del siglo XVIII, como los franceses Jacques-Christophe Valmont de Bomare, Mathurin Jacques Brisson y Pierre Barrère, los británicos John Ellis y George Edwards y el español José Gumilla. También citó a menudo los textos de los grandes naturalistas de los siglos XVI y XVII, principalmente los de Conrad Gesner, Pierre Bellon, Guillaume Rondelet, Francisco Hernández, Ulisse Aldovrando y Jacobus Bontius y, con menor frecuencia, los de diferentes viajeros de su propia época. En el terreno terminológico, recogió de primera mano los nombres vulgares castellanos y algunos catalanes de animales de la Península Ibérica y las Baleares; anotó de manera constante los términos en latín y francés que encontró en la bibliografía y, a veces, vocablos en italiano, griego o idiomas exóticos.

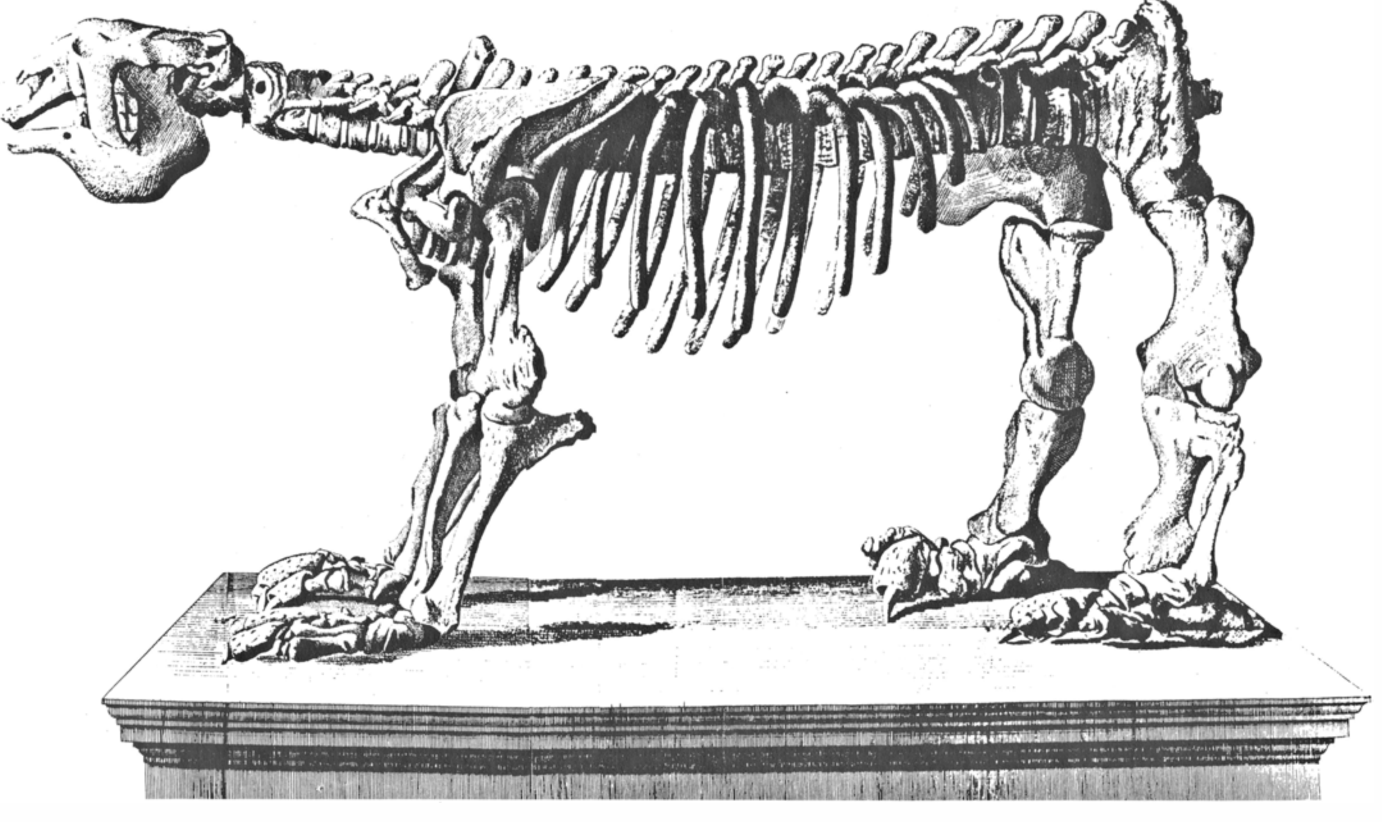
Las explicaciones sobre cada animal están fundamentalmente dedicadas a su descripción, aunque siempre incluyen noticia acerca de sus costum-

bres y de su hábitat. En el prólogo que encabeza el segundo volumen de la obra, Bru se propuso "demostrar no ser tan general, como algunos suponen, la regla de que los animales de países muy cálidos o muy fríos no procrean en otros temples", al comentar la procedencia geográfica de los que estudiaba. Con este motivo, da noticia de sus observaciones, "en varias lagunas del reino", acerca de la nidificación de "diversidad de aves extrañas de diversas épocas... que sólo vienen de paso y que permanecen unas durante el verano, otras el invierno". También informa de cómo se habían reproducido los animales exóticos que vivían en libertad en los sitios reales, en contraste con los enjaulados en la "casa de fieras" del Retiro, cuya ausencia de crías atribuye "a la opresión y estrechez en que viven y a la falta de libertad en tiempo de celo". La descripción que hace de la situación de estas últimas es muy expresiva: "Por lo común se les encierra en jaulas pequeñas, donde apenas pueden andar algunos pasos sin que les dé el sol, ni se renueve el ambiente; de que resulta vivir poco, aun cuando no estén hambreando, que es lo ordinario; y si están bien mantenidos, padecen por falta de exercicio otros males que igualmente les acortan la vida".

Anotemos, por último, que la mayor parte de las láminas de la obra están dedicadas a mamíferos (22) y aves (31); el resto se distribuye entre peces (11), reptiles (2) y "monstruos" (5). Solamente 13 de dichas especies son propias de la Península Ibérica y las Baleares. La *Colección* de Bru se ocupa principalmente, por razones obvias, de "animales raros que vienen de países extranjeros"; más de la cuarta parte, de América (24) y los demás, de muy variados lugares del mundo, desde Africa tropical y meridional, Asia oriental y el Pacífico, hasta Laponia y zonas de la Europa occidental, como el Ducado de York, de donde procede el "lobo marino".

Antonio Sáñez Reguart († 1796), Comisario de Guerra de Marina y director de la Real Compañía Marítima durante los años finales del siglo XVIII, fue autor de notables aportaciones de carácter científico y técnico que no han sido hasta ahora estudiadas. Nos interesa aquí principalmente su libro *Colección de producciones de los mares de España*, en el que, como hemos adelantado, colaboró Bru. Hasta hace poco, la única referencia publicada tocante al mismo aparecía en el catálogo de grabados de la Biblioteca de Palacio, de Madrid, confeccionado por Miguel Velasco Aguirre. Describe en ella una serie de ciento treinta y tres láminas allí conservada, que lleve el siguiente título manuscrito: *Colección de los Peces y demás producciones marítimas de España formada de orden de S.M.* A continuación del título, figura una advertencia igualmente manuscrita en la que, entre otras cosas, se afirma que su autor la formó, recorriendo "desde 1780 todas las costas de la Península, que expresamente rodeó por la orilla del agua, recogiendo, observando y escribiendo sobre los peces, insectos marinos, crustáceos, testáceos, plantas y aves marinas de ambos mares", así como que se encargó de "desempeñar la parte anatómica" y del "grabado e iluminado DL. Juan Bru de Ramón"; también se dice que la obra quedó interrumpida en 1790 al dedicarse el autor a preparar, por orden real, su *Diccionario histórico de los artes de la pesca nacional*. El título y la advertencia contienen varias notables inexactitudes, la más importante de las cuales son llamar al autor "Antonio Gómez Reguart", declarar la obra interrumpida en 1790 y considerar a Bru autor de los dibujos.

Los originales del libro de Sáñez Reguart se conservan en la biblioteca del Museo Nacional de Ciencias Naturales, de Madrid, institución continuadora del Real Gabinete. Se trata, en primer lugar, de un volumen manuscrito cuyo título, que sirve de portada, dice: "Colección de producciones de los mares de España. Tomo 1.º Formada de orden de S.M. Por Dn. Antonio Sáñez Reguart... Año de 1796". Tiene trescientos siete folios, en los que figuran,



3. Primera de la serie de cinco láminas que ilustran el estudio anatómico que Bru realizó al montar el esqueleto de **Megatherium**.

sucesivamente, el índice de la obra, una "Advertencia" general, una "Introducción a la historia de los peces, y producciones marinas de España" y la "Parte 1. Sobre los Peces largos y angostos". En la "Advertencia", Sáñez Reguart informa con detalle acerca de la realización de la obra. Reunió, en primer término, a lo largo de años, un "crecido número de dibujos, apuntaciones y memorias", todos ellos procedentes de su "constante observación en las playas de nuestra Península". En 1783 se decidió "a reunir metódicamente el montón de mis escritos" y a publicar un tratado sobre la fauna marina española, al no existir más estudio acerca de la misma que el libro sobre la de Galicia (1788) de José Cornide. Para la iconografía tuvo como colaborador a "Miguel Cros, natural de Freibourg, por cuya mano está dibujada del natural toda la colección". Presentó el proyecto al rey, quien "se sirvió por su Real orden de 25 de enero de 1784 mandarme continuase la obra hasta su conclusión".

Cuando terminó la parte relativa a las "costas de Asturias y Cantabria", que incluía trescientos dibujos, la presentó al monarca, que determinó "se grabase e iluminasen a sus expensas", momento en el cual se inició la participación de Bru en el libro. Más tarde, Sáñez Reguart y Cros continuaron trabajando en las costas mediterráneas y atlánticas, reuniendo a finales de 1787 doscientos nuevos dibujos y los correspondientes textos. La "Advertencia" justifica que la publicación de la obra se retardase luego por "varios objetos relativos al mismo Real servicio a que por órdenes superiores fue preciso atender en 1788 y especialmente por la formación del *Diccionario de Artes de la pesca nacional*, cuyo 5.º y último tomo se acaba de publicar; a que se añade una larga penosa enfermedad de cerca de tres años de que aún no me hallo restaurado".

Entre 1791 y 1795 se habían publicado, en efecto, en la célebre imprenta madrileña Ibarra, los cinco volúmenes del *Diccionario histórico de los artes de la pesca*, de Antonio Sáñez Reguart. Estructurado en capítulos por orden alfabético, incluye 357 láminas de tamaño folio y es la más importante obra sobre el tema que ha aparecido en España. Por el contrario, el otro gran tratado en el que durante tantos años había trabajado su autor permaneció inédito. Sáñez solamente llegó a terminar el tomo del que acabamos de ocuparnos, al que acompaña un "Atlas" con diez dibujos de peces y dieciocho ya grabados, todos ellos relativos a las especies estudiadas en el texto, más otras dos calcografías de tipo alegórico. Por otra parte, en la misma biblioteca del Museo Nacional de Ciencias Naturales se conservan tres volúmenes en folio mayor en cuyo lomo figura la leyenda siguiente: "Dibujos que se creen orijinales de la colección de los mares de España". Incluyen un total de 419 dibujos en color, seguramente todos los que hizo Miguel Cros; entre ellos, hay seis duplicados y una veintena de dibujos desechados o borradores. Sáñez Reguart falleció el mismo 1796, sin duda víctima de la enfermedad a la que se había referido en su "Advertencia". En noviembre de dicho año se encargó de la continuación de la obra a José Garriga, ingeniero catalán entre cuyas heterogéneas actividades figuraba la de naturalista. Sin embargo, en febrero siguiente, escribió a Clavijo renunciando, "por no sufrirlo mis ocupaciones" y "reintegrando al erario real lo que ha costado hasta ahora".

La obra quedó, en suma, sin publicar aunque, aparte de los originales que hemos descrito, quedaron los grabados que, por encargo regio, Bru había comenzado a realizar a finales de la década de los ochenta, a partir de los primeros trescientos dibujos entregados por Sáñez y Cros. La serie más completa que se conserva es la de la Biblioteca del Palacio Real, integrada, como hemos dicho, por ciento treinta y tres láminas, quizá todas las que Bru grabó. Series más cortas existen en otras instituciones, entre ellas, una de cuarenta y un grabado en la Biblioteca Nacional, de Madrid, descrita recientemente en el catálogo de Páez Ríos. Por otra parte, en la Calcografía Nacional, asimismo en Madrid, se conservan sesenta y siete de las planchas de calcografía grabadas por Bru para el libro de Sáñez Reguart, así como cierto número de ejemplares, algunos iluminados y otros sin colorear, varios de los cuales se han ido vendiendo durante los últimos años.

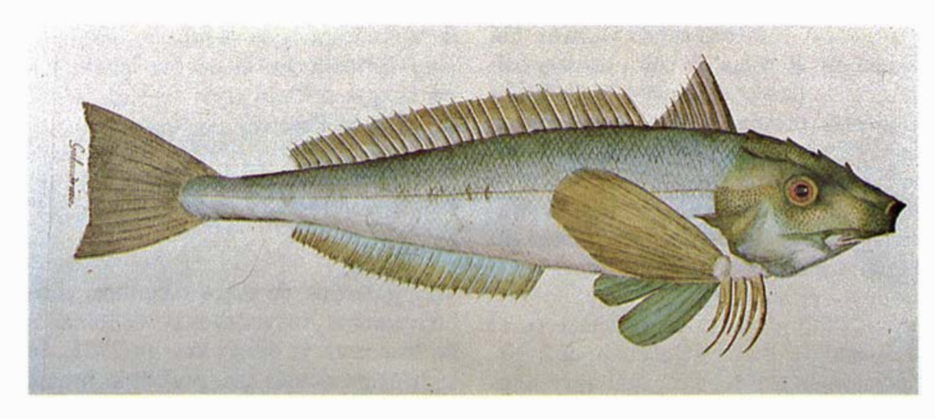
Algunas anotaciones manuscritas del artista y disecador valenciano que figuran en los dibujos originales de Cros y en los folios que los acompañan en los tres volúmenes antes citados permiten conocer detalles de cómo realizó este trabajo. Los que llevan la indicación "G°" (grabado) coinciden con las láminas y planchas conocidas. Destaca el hecho de que todos correspondan a peces, excluyendo no solamente un cetáceo y tres tortugas, sino el centenar de dibujos dedicados a crustáceos, anélidos, cirrípedos, moluscos y radiolarios. En algunos, aparecen anotaciones marginales con nombres de los animales en catalán y en otros, indicaciones de que no debían grabarse, como "no se ase" (no se hace), "desechada" o "debió desecharla el autor"; esta última sugiere que Bru debió continuar su trabajo después de muerto Sáñez Reguart o quizá simplemente que lo hizo en su ausencia. En cualquier caso, la relación entre ambos no se redujo a esta tarea truncada, ya que Bru dibujó una alegoría de la pesca de gran tamaño que figura como primera lámina en el *Diccionario* de Sáñez.

Resulta chocante que la contribución de Bru de mayor trascendencia científica –el montaje y la descripción del primer esqueleto de *Megatherium* y, en general, de mamífero fósil– no haya sido mencionada por los pocos estudiosos que se han ocupado de él, con la única excepción, que yo conozca, de la breve noticia de Piveteau. La falta de información y las confusiones en torno a la cuestión se explican por las circunstancias, realmente laberínticas, en las que se dieron a conocer los dibujos de Bru sobre el esqueleto y se publicó su estudió anatómico acerca del mismo, tanto el original castellano como la traducción al francés.

Como hemos adelantado, el esqueleto de megaterio fue enviado en 1789 por el virrey del Río del Plata, marqués de Loreto. Se recibió exactamente el 29 de septiembre de dicho año, "en 7 caxones, con una relación que manifestaba haberse encontrado en las excavaciones que se hacían en las orillas del río Luxán, que corre inmediato a la villa de este nombre (que está a unas trece leguas O.S.O. de Buenos-Ayres) en una barranca de diez varas de alto que está a legua y media del S.O. de dicha villa". Bru debió ponerse a trabajar casi inmediatamente en tan interesante material porque, cuatro años más tarde, no solamente había terminado un detenidísimo estudio anatómico del esqueleto, lo había montado e instalado "sobre un pedestal grandioso en una sala de petrificaciones de este Real Gabinete", sino que tenía preparada para su edición una monografía sobre el tema. Dicha publicación estaba integrada por una extensa descripción y por veintidós dibujos, uno del esqueleto montado y los demás de huesos sueltos, en cinco láminas de gran tamaño calcografiadas por Manuel Navarro, grabador conocido por otros trabajos asimismo de tema científico. Por dificultades que desconocemos la monografía no apareció, pero su preparación debía estar tan adelantada que un tal Roume, representante del gobierno francés en Santo Domingo, consiguió un juego de

pruebas de las planchas a su paso por Madrid en 1793.

Roume era miembro correspondiente del Institut de France, al que envió las pruebas "sin descripción, y solamente con una breve nota suya". La sección de ciencias del Institut encargó a Georges Cuvier un informe sobre el tema, que apareció resumido en la revista *Magasin encyclopédique*, acompañada de la que el propio Cuvier consideró "una mala copia de la figura del esqueleto entero". En esta noticia, el gran paleontológo y anatomista comparado incurrió en varios errores –comenzando por decir que el esqueleto se había encontrado en Paraguay– pero encuadró ya al animal entre los desdentados e incluso le dio el nombre genérico de *Megatherium* y el específico de *Megatherium americanum*.



*4. "Golondrino" (***Trigla hirundo** Bl.*), uno de los grabados de Bru destinados a la gran obra ictiológica de Antonio Sáñez Reguart,* **Colección de producciones de los mares de España** *(1796).*

Un ejemplar de la noticia de Cuvier llegó a Madrid a manos del ingeniero José Garriga. Pensó éste que convenía publicar una traducción castellana de la misma pero, al buscar las láminas de las que hablaba el científico francés, supo que Bru "al tiempo de delinearlas, había hecho una descripción del esqueleto". Lo convenció de que le vendiera el texto y las láminas y publicó en un folleto, editado el año 1796 a su costa en la imprenta de Ibarra, todo el material, precedido de un prólogo y de una pomposa descripción suya del "esqueleto en general, según se ve colocado en este Real Gabinete".

El texto de Bru se titula "Descripción del esqueleto en particular, según las observaciones hechas al tiempo de armarle y colocarle en este Real Gabinete" y ocupa dieciséis folios de apretada impresión. Comienza advirtiendo que, "en cada hueso del esqueleto de que se trata, he procurado no sólo conservar los nombres que dan los anatómicos a los del cuerpo humano cuando hallo alguna relación o semejanza entre unos y otros, sino también los de diversas partes que se advierten en cada uno en particular, como *eminencias, salidas, fosas, cavidades*, etc.". La descripción va anotando el parecido y las diferencias de cada parte con la correspondiente del esqueleto humano y también con huesos de elefante, rinoceronte, caballo y otros animales. Está dividida en once partes: "cabeza", "cuello", "espalda", "hueso sacro", "cola", "pecho", "costillas", "brazo", "mano", "pierna" y "pie". Al anotar que faltan los huesos de la cola, afirma que "no he querido suplírselos artificialmente, aunque lo intenté, pareciéndome que... nunca dexaría de ser una figura que estribase sobre un fundamento conjetural". Tampoco emite ninguna opinión acerca del probable encuadramiento taxonómico del animal, limitándose a destacar su condición peculiar: "Las luces que me ofrece la anatomía comparada, o la zootomía, en la que tengo algún conocimiento, se desvanecen en todo punto al considerar que se trata de un esqueleto único en su especie y, lo que es más, no conócese otro que se asemeje a él".

A continuación del texto de Bru, el folleto editado por Garriga incluyen la noticia de Cuvier aparecida originalmente en el *Magasin encyclopédique* y, por último, las cinco láminas con los dibujos del valenciano. La primera de ellas representa, como hemos adelantado, el esqueleto completo ya montado. Las figuras de las otras cuatro corresponden al cráneo y un molar suelto; el atlas y una vértebra torácica; la clavícula, el omoplato y una costilla; el sacro; los huesos largos de las extremidades anteriores y posteriores y los de las patas, con detalle de una falange. Todas las láminas llevan escalas en pies castellanos y franceses. Los dibujos están a la altura de la ocasión. También la ejecución de los grabados por Miguel Navarro y la impresión de Ibarra son de elevada calidad.

El folleto de Garriga sirvió de base para que Cuvier publicara en 1804, en los *Annales du Muséum National d'Histoire Naturelle*, un importante artículo titulado "Sur le *megatherium*", donde expuso importantes precisiones a favor de su opinión acerca de "la afinidad de este animal con los perezosos y otros desdentados, afinidad sobre la que he argumentado de manera más precisa en mi *Tableau élémentaire de l'histoire des animaux*, situando el megaterio a continuación de los perezosos y en la misma familia". A continuación de su artículo, Cuvier publicó una traducción francesa, ligeramente resumida, de la "Descripción del esqueleto", de Bru, así como una reproducción de sus dibujos. Con ello, la contribución del pintor y naturalista valenciano, cinco años después de su muerte, se difundió a la comunidad internacional a través de la revista especializada más importante de la época. El traductor del texto fue Aimée Bonpland, el naturalista francés que había acompañado a Alexander von Humboldt en su estancia en España y su viaje por la América española (1799-1804). Las únicas notas al texto de Bru consistieron en indicar que había confundido la extremidad inferior con la superior y comentar que había comprado las "lengüetas huesosas" de los dedos del megaterio a las garras de los tigres y leones. Los veintidos dibujos están reproducidos al tercio de su tamaño original en dos láminas. La segunda de ellas incluye, además, otros tres –que representan el cráneo visto desde atrás y los huesos de la pata anterior y de la posterior– que no son de Bru, sino de un tal "Ximeno". Quizá se trate del también valenciano José Antonio Ximeno Carrera, grabador dedicado principalmente a la ilustración de libros. En cualquier caso, de un artista residente en Madrid que cumplió el encargo de Bonpland.

Cuvier incluyó su artículo en los *Annales* sobre el megaterio, junto a las láminas y la traducción francesa del texto de Bru, en su obra *Recherches sur les ossements fossiles* (1812), uno de los grandes títulos clásicos de la historia de la paleontología. La primera de las láminas que recogen los dibujos del valenciano ha sido reproducida, sin citar para nada a Bru, en numerosas publicaciones. Entre ellas figura el libro de divulgación de Alan Moorehead, *Darwin and the Beagle*, cuya traducción castellana ha tenido una amplia difusión en España, sobre todo en relación con el

centenario de la muerte de Darwin. Un elocuente síntoma de colonización cultural y de desconexión con la tradición científica propia es que nadie parece haber sospechado que se trataba de un esqueleto que se conserva en el Museo Nacional de Ciencias Naturales, de Madrid y de los dibujos del naturalista español que lo montó.

En 1832, durante su estancia en el Río del Plata, en el curso de la expedición en el "Beagle", Darwin descubrió huesos de megaterio y de otros mamíferos fósiles en el acantilado de Punta Alta. Como es sabido, en sus cartas familiares de esa fecha afirmó que el hallazgo le compensaba moralmente de todos los esfuerzos que había realizado, porque el único ejemplar conocido hasta entonces estaba en Madrid. La reconstrucción del esqueleto de *Megatherium* que aparece en una figura de su *Journal of researches*, correspondiente a la citada expedición, está completamente basada en la de Bru, a través de las publicaciones de Cuvier. En ella continúan todavía apoyadas en el suelo las cuatro patas del animal, ya que la única modificación es que el dibujo está trazado desde una perspectiva casi frontal en lugar de la lateral utilizada por Bru.

A lo largo de 1833, un año después de los hallazgos de Darwin en Punta Alta, el embajador británico en Madrid solicitó en varias ocasiones permiso para vaciar en yeso algunas piezas del esqueleto de megaterio existente en el Real Museo de Ciencias Naturales, nombre del Real Gabinete desde 1815. La Junta de Protección del Real Museo contestó negativamente dicha solicitud, que iba acompañada por una exposición del Royal College of Surgeons, de Londres. La negativa se fundó en el informe emitido por Tomas Villanova, entonces profesor de zoología del Museo. Aducía en él la extrema fragilidad del ejemplar, que "tiene todos los huesos calcinados en términos que la mayor parte de las apófisis se fracturan al simple tacto con la mano... Yo mismo he reconocido varios defectos anatómicos que tiene el expresado esqueleto y muchos de ellos los ha expresado Cuvier en su obra de fósiles, y a pesar de ser un descrédito para mí el que existan, no me atrevo a enmendarlos, porque sólo su desarme, que para esto era necesario, sería causa de que se echasen a perder muchos huesos y se inutilizase una pieza única en su especie". Villanova llega a llamar al esqueleto "precioso tesoro, honor del Gabinete español", pero no cita en ningún momento el nombre de Bru. Un tercio de siglo después de su muerte, había ya sido olvidado en la propia institución en la que trabajó toda su vida. (José M.ª López Piñero.)

Premios Nobel

Física

El galardón de física reconoce, simbólicamente, los méritos de centenares de físicos en la detección, en 1983, de las tres partículas que portan la fuerza nuclear débil, los bosones vectoriales intermedios W^+, W^- y Z^0. La prueba experimental de la existencia de las tres partículas constituyó un paso decisivo en la confirmación de la denominada teoría electrodébil, considerada ya una de las contribuciones capitales de nuestro siglo a la comprensión unitaria de los procesos fundamentales.

Comparten el premio dos de los integrantes más imaginativos y activos del grupo de experimentadores: Carlo Rubbia, de la Universidad de Harvard y del CERN, el Centro Europeo de Investigación Nuclear, con sede en los aledaños de Ginebra, y Simon van der Meer, también del CERN. Ambos conocidos por nuestros lectores.

Hasta hace unos 15 años, las cuatro fuerzas naturales observables (la electromagnética, la nuclear débil, la nuclear fuerte y la gravitatoria) parecían guardar escasa dependencia mutua. Los efectos de la fuerza nuclear débil quedan confinados a un estrecho rango: 10^{-16} centímetros del núcleo (una milésima del diámetro del núcleo de hidrógeno), mientras que se tiene por infinito el alcance de la fuerza electromagnética. La teoría electrodébil, sin embargo, las considera dos manifestaciones distintas de un mismo fenómeno subyacente.

Según establece la teoría (por cuyo enunciado ganaron en 1979 el premio Nobel Steven Weinberg, Abdus Salam y Sheldon Lee Glashow), los tres bosones vectoriales detectados en el CERN ejercen de intermediarios entre partículas que interactúan débilmente, de manera similar a como el fotón media entre dos partículas cargadas eléctricamente. A diferencia del fotón, sin embargo, que carece de masa, se había predicho que los tres bosones vectoriales intermedios serían bastante pesados, para lo que suele ser común entre las partículas elementales: entre 80.000 y 90.000 millones de electronvolt.

No hace mucho se consideraba que los aceleradores de partículas existentes no tenían potencia suficiente para crear partículas de esa masa. Rubbia impulsó la idea de transformar el gran anillo de aceleración del CERN, que disparaba protones contra un blanco fijo, en una máquina de colisión de haces: los protones acelerados en el anillo que vienen en sentido contrario. La energía liberada en los choques frontales es mayor que la que producen los choques contra objetivos fijos.

Resulta difícil generar antiprotones, de ahí que no se disponga de muchos en cada ensayo. Ello obliga a colimar extraordinariamente el haz, es decir, a enfocarlo, de modo que el número de colisiones sea suficiente para arrojar resultados con validez estadística. En ese sentido, Van der Meer aportó una idea nueva para "enfriar" el haz de antiprotones, esto es, reducir sus movimientos aleatorios. Se dispusieron varios sensores, a lo largo del anillo, para detectar la dispersión del haz. Los sensores transmiten una señal a un dispositivo, el denominado "kicker". La señal se manda a través del anillo, de modo que se reciba antes de la llegada del paquete de antiprotones. El kicker aplica un campo electromagnético que corrige la dispersión del paquete.

Fisiología y medicina

En su autobiografía, Sir Macfarlane Burnet, ganador del premio Nobel de fisiología y medicina en 1960, calificaba así a Niels Kaj Jerne: "el inmunólogo vivo más inteligente". El pasado mes de octubre, el comité Nobel le otorgó el galardón de 1984, que comparte con otros dos inmunólogos. Según el comunicado del comité, Jerne sería "el gran teórico de la inmunología", y, el desarrollo de las técnicas de obtención de anticuerpos monoclonales por parte de César Milstein y Georges J. F. Köhler, "uno de los mayores logros metodológicos de la década de 1970 en biomedicina", de cuya naturaleza escribió en estas mismas páginas el propio Milstein.

Jerne, danés que trabajó en Estados Unidos y Alemania Federal antes de su acceso a la dirección del Instituto de Inmunología de Basilea, Suiza, recibe el premio por su desarrollo de tres teorías. Su teoría selectiva de formación de anticuerpos, publicada en 1955, ha facilitado la visión moderna del mecanismo de que se vale el sistema inmune para proteger al organismo de la ingente variedad de sustancias extrañas, la mayoría de las cuales no se le han presentado nunca antes.

La superficie de los virus, bacterias o cualquier otra sustancia extraña (antígeno) que penetre en el cuerpo contiene los denominados epitopos, o determinantes antigénicos. Al enfrentarse al

sistema inmune del organismo, instan la proliferación de anticuerpos específicos, que se unen al antígeno y disparan una serie de fenómenos que los neutralizan. Las teorías "instructivas" en boga en la década de 1950 sostenían que el propio antígeno extraño aportaba la información para la elaboración de un antígeno específico capaz de encajar y unirse a aquél.

La teoría selectiva de Jerne sugiere que la presencia del antígeno no induce en las células del sistema inmune la síntesis de un anticuerpo concreto, antes bien, elige uno del amplio repertorio de los ya elaborados. Burnet demostró que lo que el antígeno escogía era cierto clon de células del sistema inmune (los linfocitos *B*), programados de antemano para la síntesis del anticuerpo adecuado.

La segunda teoría de Jerne pretendía explicar el proceso por el cual los linfocitos *T*, otra célula inmunitaria, maduran en el timo y aprendían a distinguir lo "propio" de lo "ajeno" o extraño.

Por último, la teoría reticular de Jerne, desarrollada en 1973, sostiene que debe contemplarse el sistema inmune como una "red funcional" autorregulada de anticuerpos y linfocitos en interacción. Propone que los organismos no sólo disponen de anticuerpos contra determinantes antigénicos de moléculas extrañas, sino también contra sus propios anticuerpos y los receptores de propias células *T*; la interacción de todos esos anticuerpos y anti-anticuerpos estimula o reprime la respuesta del sistema inmune frente a un antígeno extraño [véase *Inmunología*, Prensa Científica; Barcelona, 1984].

Había escrito Milstein en cierta ocasión: "Quién pudiera extraer una sola célula de las que elaboran un anticuerpo específico y cultivarla in vitro...". Milstein y Köhler comparten el premio precisamente por esa hazaña.

Al inmunizarse un animal frente a una sustancia extraña, su suero contiene una mezcla de antibióticos que se unen, con mejor o peor eficacia, a un gran número de determinantes antigénicos; resulta imposible aislar del suero un anticuerpo específico que se una a cierto determinante conocido. Sin embargo, todo anticuerpo procede de una única línea de descendencia de linfocitos *B*, y ello impulsó a Milstein a expresar su anhelo. El problema radica en que las células que sintetizan anticuerpos no soportan su cultivo en medios artificiales. Milstein y Köhler resolvieron ese obstáculo.

En 1975, Milstein trabajaba en el Laboratorio de Biología Molecular del Consejo Británico de Investigación Médica; Köhler era becario postdoctoral. (Luego se trasladaría al instituto de Jerne.) Se les ocurrió fundir linfocitos normales, de ratones inmunizados con un antígeno conocido, y células de mieloma, células malignas (y por tanto inmortales) de un tumor del sistema inmunitario. El producto de la fusión, un "hibridoma", conserva la capacidad linfocítica de sintetizar un anticuerpo específico y la de crecer indefinidamente del mieloma. Las células de hibridoma sí son susceptibles de aislamiento y cultivo en medio artificial, generando cada una un clon de células. Tales clones elaboran grandes cantidades de un solo anticuerpo, que reconoce un único determinante antigénico; elaboran, pues, anticuerpos monoclonales.

Los anticuerpos monoclonales constituyen ya herramientas habituales en la localización, identificación y aislamiento de moléculas incluidas en mezclas complejas o en tejidos. En medicina apunta su empleo como proyectiles terapéuticos dirigidos: anticuerpos monoclonales que se enlazaran exclusivamente a antígenos de la superficie de las células cancerosas. Si se lograra empalmar a ese anticuerpo un agente anticanceroso, la "inmunotoxina" resultante atacaría las células malignas sin dañar las sanas.

Química

Una idea "sencilla e ingeniosa" para la síntesis automática de proteínas, que "ha abierto posibilidades insospechadas en el campo de la química de péptidos y proteínas... así como en el de la química de los ácidos nucleicos", según los términos con que se otorga el galardón, le ha valido a R. Bruce Merrifield, de la Universidad de Rockefeller, el premio Nobel de química de 1984.

A finales de la década de 1950, Merrifield inició el desarrollo de un procedimiento de ensamblaje de aminoácidos, de uno en uno, en cadenas de los denominados péptidos, modelos sencillos de proteínas, de las que sólo se diferencian por su menor número de elementos estructurales. El procedimiento de Merrifield, por tanto, permite la síntesis automatizada de moléculas completas. La primera proteína obtenida por Merrifield y sus colaboradores, en 1965, fue la insulina.

Según el método de Merrifield, el primer aminoácido de la cadena peptídica se une a una cuenta de poliestireno; las restantes unidades de aminoácidos se añaden, paso a paso, en la secuencia adecuada. La cadena finalizada se separa fácilmente de la matriz.

Tan sencilla e ingeniosa idea ha tenido consecuencias profundas. Por ejemplo, ha permitido la elucidación del efecto de la estructura en la función biológica de muchas proteínas, enzimas, hormonas y anticuerpos incluidos. Esa nueva información está conduciendo a importantes aplicaciones médicas.

Puesto que la técnica sirve para elaborar proteínas o fracciones de proteínas, ha facilitado el desarrollo de los anticuerpos monoclonales. Se emplea a menudo la síntesis de péptidos en fase sólida para obtener péptidos antigénicos, que a su vez se usan en la elaboración de los clones de células híbridas que producen grandes cantidades de anticuerpo para ese antígeno.

Numerosos laboratorios exploran la posibilidad de fabricar vacunas sintéticas contra enfermedades víricas del tipo de la gripe, la rabia y la hepatitis. Se trataría de sintetizar la porción de la cápsula proteica del virus que tiene propiedades antigénicas y emplear ese péptido antigénico para inducir la producción de anticuerpos en el paciente. Esa técnica eludiría el peligro que comportan las vacunas a base de virus muertos o atenuados, que guardan a veces potencia suficiente para provocar la enfermedad.

Otra aplicación de la síntesis de péptidos en fase sólida es la obtención de péptidos de valor terapéutico, así la hormona pituitaria ACTH y la hormona tiroidea calcitonina. El laboratorio de Merrifield ha sintetizado ya glucagón, una proteína del páncreas. Esa hormona aumenta la concentración sanguínea de azúcar por incremento de la degradación de glucógeno en el hígado. El paso siguiente será obtener análogos del glucagón que faciliten el diseño y producción de inhibidores artificiales de la hormona. Competirían con el glucagón por los lugares de activación hepáticos, pero no inducirían la producción de glucosa. Se reduciría así el alto contenido sanguíneo de glucosa de los diabéticos, y con ello la cantidad de insulina que debe administrárseles.

Los trabajos habrán de conducir asimismo a la síntesis de importantes fármacos de nuevo cuño. Ejemplo de ello es la labor emprendida con la anafilotoxina C3a, polipéptido de 77 aminoácidos que interviene en la inflamación y demás efectos que insta el sistema inmune en respuesta a una infección. Al fabricar péptidos sintéticos, el laboratorio advirtió que la porción activa de la molécula eran los últimos cinco aminoácidos. Pretende el estudio desarrollar fármacos antiinflamatorios que neutralicen la C3a y ayuden a reducir las lesiones hísticas provocadas por enfermedades como el asma y la artritis.

Interacción entre el viento solar y la ionosfera de Venus

Observaciones realizadas con satélites artificiales en Venus indican que el viento solar se comporta como un fluido viscoso que arrastra al material ionosférico. Existe una semejanza geométrica entre rayos cometarios y nubes de Venus

Héctor Pérez de Tejada

Uno de los resultados más importantes obtenidos durante la reciente exploración experimental del planeta Venus ha sido el descubrimiento de la suma debilidad de su campo magnético interno. Por las mediciones realizadas con vehículos espaciales soviéticos y norteamericanos sabemos ya que la magnetización de ese planeta no llega ni siquiera a la diezmilésima parte de la que tiene la Tierra. (En la superficie de nuestro planeta, la intensidad del campo magnético es aproximadamente de 0,6 gauss.) Venus representa, en el sistema solar, el caso extremo de un planeta esencialmente no-magnético, en abierto contraste con otros (Mercurio, Tierra, Júpiter y Saturno), en los que se ha medido una apreciable magnetización interna.

Las consecuencias de tan baja magnetización se manifiestan, entre otras cosas, en el hecho de que Venus presenta, al paso del viento solar, un obstáculo radicalmente diferente del que ofrecen los otros planetas. En la Tierra, por ejemplo, el campo geomagnético evita que las partículas eléctricamente cargadas (protones y electrones, sobre todo) que forman el viento solar incidan directamente sobre la ionosfera de nuestro planeta. En Venus, el débil campo magnético interno no es capaz de producir este efecto y, por ello, su atmósfera recibe el impacto frontal del viento solar. Bajo dichas condiciones, las capas superiores de la ionosfera se ven comprimidas hacia el planeta y, el viento solar, forzado a fluir en su entorno. Este comportamiento fue descubierto en las primeras mediciones experimentales realizadas en Venus al observarse que la densidad de partículas ionosféricas no decrecía gradualmente con la altura sino que terminaba abruptamente, a unos cuantos cientos de kilómetros de la superficie. A esta caída repentina de la densidad de partículas ionizadas, que marca la frontera superior de la ionosfera, se le conoce como ionopausa. Se produce en ella un equilibrio entre la presión cinética de las partículas del viento solar que inciden por fuera y la presión térmica de las partículas ionosféricas que reciben el impacto de aquéllas. Se debe señalar, sin embargo, que este balance de presiones no ocurre directamente entre ambas poblaciones de partículas, sino a través de un proceso electrodinámico que da lugar a que se genere una región magnética externa a esa frontera.

Antes de examinar este concepto con detalle es necesario hacer notar, primero, que el viento solar contiene también cierta magnetización; ésta se debe a que, en su movimiento de expansión desde el Sol, el gas solar tiende a conservar el flujo magnético en el que se mueve inicialmente. El efecto resultante equivale a considerar que las partículas del viento solar arrastran consigo las líneas del campo magnético del Sol. A pesar de que la intensidad del campo magnético que lleva el viento solar es apenas del orden de 10^{-4} gauss, su presencia parece determinar la configuración de la región de interacción con la ionosfera de Venus. Esto obedece a que al incidir las partículas del viento solar sobre el obstáculo ionosférico las líneas de campo magnético que arrastran tienden a acumularse alrededor del mismo. En virtud de este fenómeno se forma una región, externa a la ionopausa, en donde la intensidad magnética aumenta hasta casi 10 veces los que se observan en el viento solar lejos del planeta. A la región de campo magnético aumentado, exterior a la ionopausa, se le conoce como barrera magnética, ésta envuelve por fuera prácticamente a toda la ionosfera diurna de Venus y representa la zona de transición entre el viento solar y el material ionosférico.

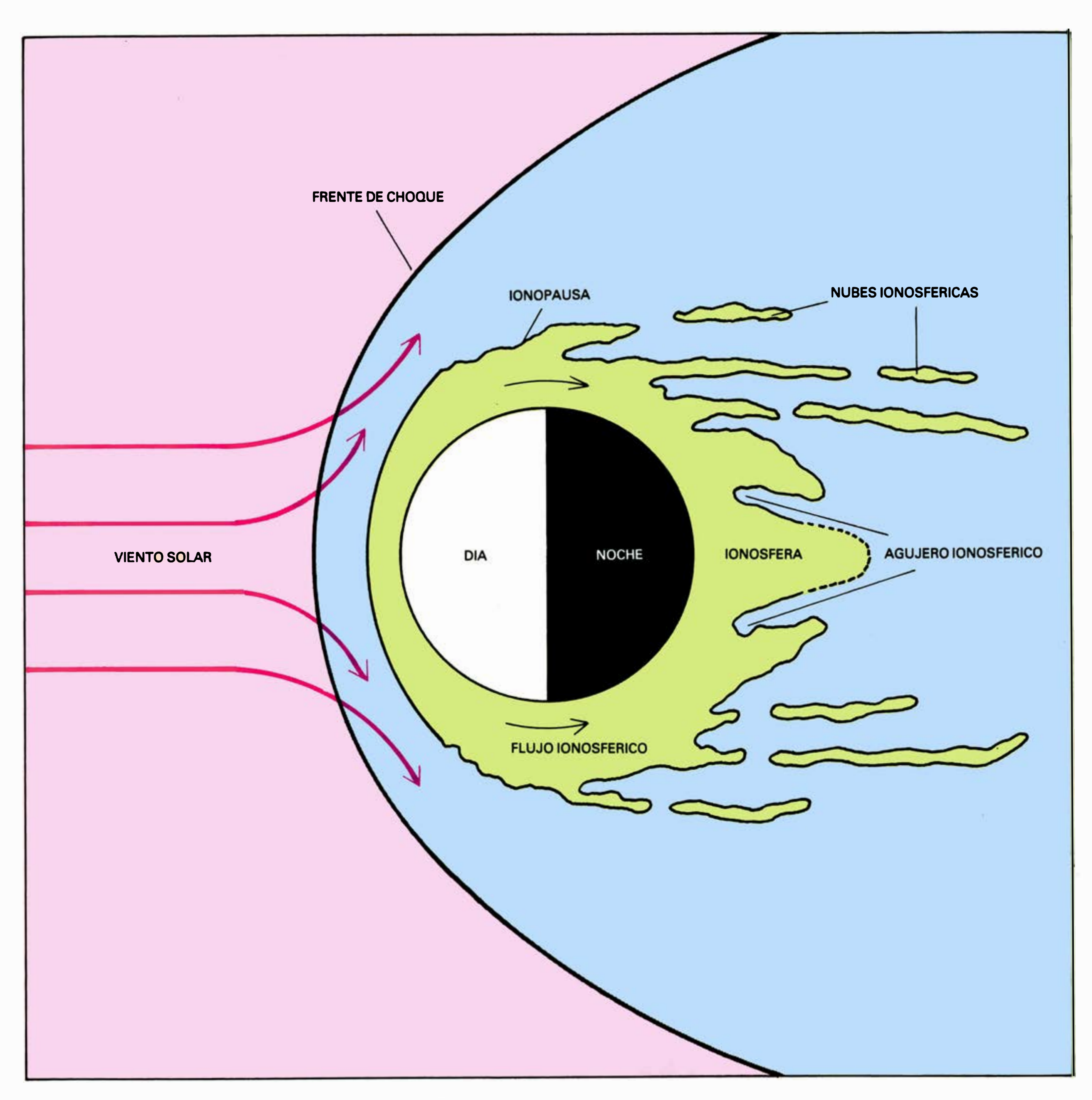
La presión del campo magnético dentro de la barrera es comparable al valor de la presión cinética del viento solar incidente. Este resultado indica que, conforme las partículas del viento solar se mueven hacia la ionopausa, su presión cinética es remplazada gradualmente por un aumento conmensurable en la presión del campo magnético que arrastran. Puede decirse, pues, que la ionosfera del planeta Venus queda confinada por el viento solar a través de su campo magnético; éste la forra por fuera y la protege, en buena medida, de la acción directa de las partículas del viento.

Del proceso de interacción que se desarrolla en la ionopausa de Venus se derivan cambios en la dinámica del viento solar, producidos por la presencia del obstáculo ionosférico. Estos cambios se manifiestan principalmente como una transición bien definida que se detecta en el viento solar a unos cuantos miles de kilómetros por arriba de la ionopausa. Tal transición es análoga al frente de choque que se produce delante de un avión en vuelo supersónico; de hecho, se genera bajo condiciones muy similares a las observadas en ese caso. Esto se debe a que la velocidad del viento solar (del orden de 300 kilómetros por segundo) es bastante mayor que la velocidad local del sonido y, por tanto, da lugar a que se produzcan efectos similares a los que ocurren a través de frentes de choque en aerodinámica. Así, se observa que el gas solar se desacelera bruscamente al llegar a la vecindad de Venus, mientras que su densidad, su temperatura y la intensidad de su campo magnético aumentan en forma considerable.

Las mediciones de campo magnético

realizadas con instrumentos a bordo de vehículos espaciales en Venus han resultado muy útiles para examinar todos estos fenómenos, pues se llevan a cabo con la frecuencia suficiente para identificar cambios repentinos en las condiciones presentes en el viento solar y dentro de la ionosfera. Los registros magnéticos obtenidos con el satélite artificial *Pionero Venus*, colocado en órbita alrededor de Venus en diciembre de 1978, han proporcionado abundante información sobre la posición, intensidad y configuración general del frente de choque y de la barrera magnética exterior a la ionopausa.

Se observa, en particular, que la intensidad magnética aumenta bruscamente cuando el vehículo espacial cruza el frente de choque en su viaje de acercamiento al planeta por el hemisferio día. Detrás del frente de choque, el campo magnético del viento solar es aproximadamente el doble de su valor original, pero continúa aumentando aún más conforme el satélite se acerca, por fuera, a la ionopausa. Al cruce de



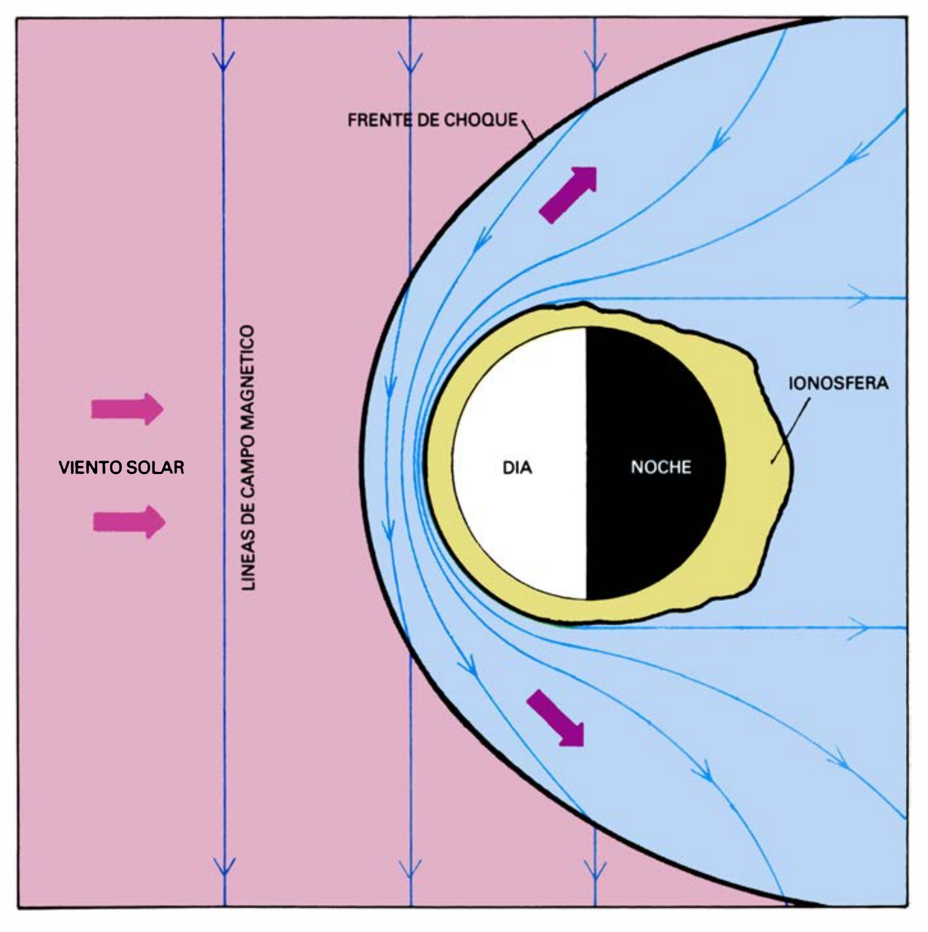
1. GEOMETRIA GENERAL de la región de interacción del viento solar con la ionosfera de Venus en el plano perpendicular al de la eclíptica. (El eje de rotación del planeta coincide aproximadamente con la dirección de la línea que separa, en el plano de la figura, a los hemisferios día y noche.) Debido a la presión cinética del viento solar incidente, la ionosfera de Venus se encuentra comprimida y acotada en el hemisferio día, y actúa como un obstáculo inmerso en el mismo viento solar. La compresión de la ionosfera se lleva a cabo a través del campo magnético del viento solar, que se acumula a su alrededor formando una barrera magnética que la cubre casi en su totalidad. Cerca de las regiones polares se produce una interacción más directa entre las partículas incidentes y las ionosféricas. En esas regiones ocurre un fuerte arrastre del material ionosférico, que llega incluso a fraccionarse formando nubes que se extienden por detrás del planeta. Dentro de la ionosfera, el material se mueve hacia el hemisferio nocturno, en donde se observan, además, agujeros que parecen estar conectados con la cola magnética del planeta. La ionosfera nocturna también está acotada por una frontera superior que puede extenderse a varios miles de kilómetros de altura. El frente de choque exterior a la ionosfera lo crean las características supersónicas del viento solar. Al cruzar esta transición, las partículas del gas solar se desaceleran y se calientan; el flujo se vuelve turbulento. (Reelaboración a partir de un original de L. H. Brace.)

esta frontera la intensidad del campo magnético cae bruscamente hasta valores inclusive menores que los medidos en el viento solar lejos de la región de interacción. Este decrecimiento repentino del campo magnético al entrar el vehículo en la ionosfera pone de manifiesto la baja magnetización interna del planeta; y le da al perfil magnético el aspecto de barrera que se repite al cruzar la ionopausa en el viaje de salida. Por otra parte, aun cuando el campo magnético medido dentro de la ionosfera de Venus sea muy bajo, se detectan ocasionalmente pulsos magnéticos angostos de gran intensidad, cuyo origen parece estar conectado con los procesos que tienen lugar en la ionopausa. Estudios recientes de la configuración magnética dentro de estos pulsos indican una geometría similar a la de una cuerda trenzada en la que las líneas de campo magnético se enrollan helicoidalmente entre sí. La estructura de estas «cuerdas magnéticas», que se extienden a lo largo de muchos cientos de kilómetros dentro de la ionosfera, recuerda la supuesta para las que conectan regiones magnéticas en la fotosfera solar y refleja la compleja dinámica del proceso de interacción que tiene lugar entre el viento solar y el material ionosférico de Venus.

Entre los aspectos más importantes de las observaciones descritas es notable el aparente comportamiento fluido del viento solar que, como se apuntó antes, da lugar a la compresión global de la ionosfera (a través de la barrera magnética) y a la formación de un frente de choque delante de ella. Estos fenómenos revisten particular interés, porque, contemplado desde el punto de vista estadístico convencional, el viento solar no puede calificarse de fluido. Tal condición obedece a que en la vecindad de Venus su densidad es tan baja (del orden de 10 partículas por centímetro cúbico) que el camino libre medio de las partículas (distancia media entre colisiones) resulta ser del orden de la distancia que media entre Sol y Venus. En consecuencia, las partículas del viento solar prácticamente jamás sufren colisiones entre sí y, por tanto, no se transmiten información directamente, como ocurre en un fluido convencional.

Sucede, sin embargo, que existen otros modos de comunicación que no requieren de las colisiones directas (coulombianas) entre los protones y electrones del viento solar. Se sabe, por ejemplo, que, incluso en ausencia de tales colisiones, el movimiento de giro que siguen las partículas eléctricamente cargadas alrededor de las líneas de fuerza de un campo magnético puede dar lugar, en ciertos casos, a un ordenamiento estadístico similar al que encontramos en un fluido. Esto obedece a que el movimiento de giro de cada partícula produce campos eléctricos y magnéticos locales que afectan el comportamiento de otras partículas. De esta manera cada una de ellas puede responder a cambios en el movimiento de las que se hallen en su vecindad a pesar de que no ocurran choques directos entre ellas. Tal es la hipótesis admitida para explicar el comportamiento fluido del viento solar y, en particular, su interacción con los campos magnéticos planetarios.

Aun cuando estas consideraciones son aplicables también al viento solar en la vecindad de la barrera magnética exterior a la ionosfera de Venus, es muy probable que sean otros fenómenos los que validen en ese caso su comportamiento fluido. Esta afirmación está basada en el hecho de que, en toda esa región, el viento solar está sujeto a efectos de contaminación producida por la presencia de partículas de origen planetario más allá de la ionopausa. Antes de describir la manera cómo estas partículas pueden modificar el comportamiento del gas solar es necesario indicar que tales partículas proceden de la fotoionización que la radiación ultravioleta solar produce en la atmósfera de Venus. Las partículas neutras de la alta atmósfera (átomos de oxígeno y de hidrógeno, sobre todo) no están acopladas electrodinámicamente con el viento solar; por tanto, pueden encontrarse inclusive a mayores alturas que la ionopausa. Esto da lugar a que exista en el viento solar una tenue componente de material neutro de origen planetario que, al ser ionizado por la radiación solar, libera iones y electro-



2. ACUMULACION DE LAS LINEAS DE CAMPO MAGNETICO del viento solar alrededor de la ionosfera de Venus. Se debe a la alta conductividad eléctrica de ésta, que determina que los procesos de difusión del campo magnético hacia su interior sean sumamente lentos. En esas condiciones, las líneas de campo magnético quedan "colgadas" alrededor de la ionosfera, conforme las partículas del viento solar, que las arrastran, fluyen hacia los flancos del planeta. La geometría mostrada representa las condiciones que se esperan en el plano en el que descansan dichas líneas de campo magnético. Este plano viene a ser paralelo al de la eclíptica y al del ecuador del planeta. Aun cuando la orientación de las líneas de campo magnético no es necesariamente en la dirección transversal a la del movimiento del viento solar, el efecto de su acumulación alrededor de la ionosfera es enteramente análogo al caso representado.

nes que interaccionan localmente con los del viento solar.

La convivencia de las partículas ionosféricas con las del gas solar, fuera de la ionosfera, provoca fenómenos que modifican el movimiento de giro alrededor de las líneas de campo magnético. Se cree, por ejemplo, que la mera presencia de los iones planetarios altera el ordenamiento espacial de las partículas del viento solar y desencadena fuertes distensiones eléctricas entre ellas. Bajo tales condiciones, las partículas pueden ejecutar violentas oscilaciones que produzcan, a su vez, intensos campos eléctricos y magnéticos de corto alcance. De semejante actividad resulta un acoplamiento efectivo entre las partículas solares y las ionosféricas a través de señales eléctricas y magnéticas de carácter turbulento. Conviene señalar, además, que la misma formación de la barrera magnética por arriba de la ionopausa parece ser consecuencia indirecta del estado turbulento del viento solar en esa región. Solamente bajo condiciones de fluido turbulento podría lograrse que las líneas de campo magnético arrastradas por el viento solar se separen del mismo para acumularse alrededor de la ionosfera. Tal comportamiento obedece a que, en general, los movimientos turbulentos reducen la movilidad de las partículas y esto, a su vez, favorece el desplazamiento relativo de las líneas de campo con respecto a las partículas.

El carácter turbulento del viento solar en la vecindad de Venus se manifiesta no solamente en su comportamiento en la región de interacción en el hemisferio diurno, sino también en la manera como se desplaza hacia los flancos de la ionosfera y hacia el hemisferio nocturno del planeta. En estas dos últimas regiones se observan fenómenos igualmente bruscos que revelan el notable comportamiento fluido del viento solar.

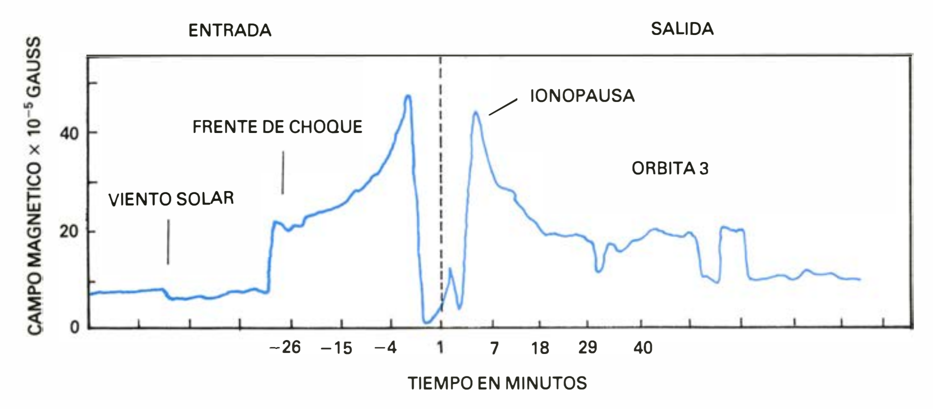
Desde que se inició la exploración experimental de Venus *in situ* se reconoció que el viento solar exhibía, en la región cercana al terminador (circunferencia que divide a los hemisferios día y noche), características diferentes de las que se apreciaban en otros planetas. Así, la velocidad del gas solar inmediato a la ionopausa era menor que la velocidad del gas que fluía lejos del planeta. Este hecho descubría la existencia de un gradiente transversal de velocidades, en vez del característico perfil uniforme que se observa fuera de los obstáculos magnéticos (magnetosféricos) de otros planetas. En Venus, la velocidad del viento solar cerca de la ionopausa, en la región del terminador, es apenas del orden de 150 kilómetros por segundo, pero aumenta gradualmente hasta alcanzar valores cercanos a los 300 kilómetros por segundo a unos 2500 kilómetros de altura. El hecho de que la velocidad del viento solar sea menor cerca de la ionopausa indica la existencia de fenómenos que lo desaceleran en esa región o que remueven localmente su momento cinético, o ambas cosas a la vez.

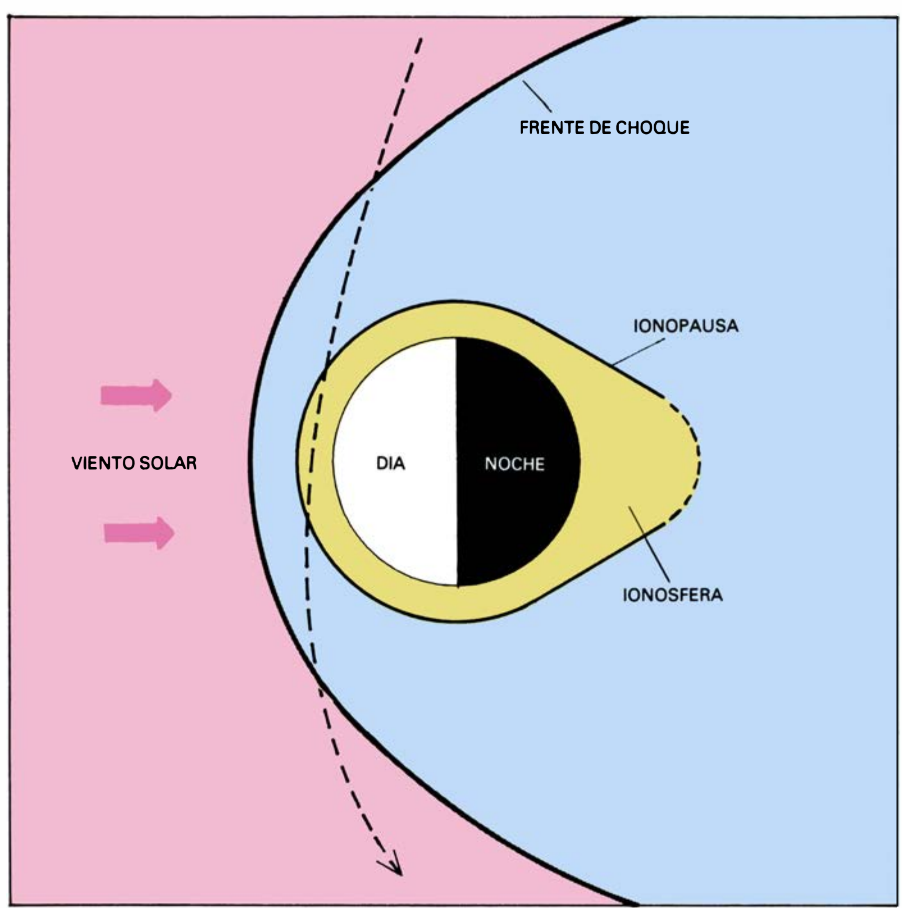
Se han propuesto varios mecanismos para explicar tal pérdida de momento cinético del viento solar en la vecindad de la ionopausa. Se ha sugerido, por una parte, que una fracción del momento cinético se transfiere viscosamente a las capas superiores de la ionosfera, tal y como ocurre cuando un flujo hidrodinámico pasa rasante sobre un fluido estacionario. El viento solar arrastraría las partículas ionosféricas hacia el lado noche y perdería, en el proceso, parte de su momento cinético. Esta interpretación requiere de un fuerte acoplamiento entre las partículas del viento solar y las de la ionosfera, para lo que es necesario que procesos turbulentos, como los que se describieron antes, permitan una eficiente transferencia de información entre las partículas. Tal explicación de fluido viscoso no es exclusiva del viento solar en la vecindad de la ionopausa. Se ha sugerido también para el proceso de interacción que tiene lugar en la frontera exterior de la magnetosfera de la Tierra. En Venus, sin embargo, las condiciones parecen ser más adecuadas para que se lleve a cabo una transferencia más eficaz de momento cinético a las partículas planetarias.

Es necesario señalar que también se han propuesto otros mecanismos para explicar la pérdida de momento cinético del viento solar en la vecindad de la ionopausa de Venus. Estos están relacionados con la presencia de partículas atmosféricas, neutras e ionizadas, que contaminan al viento solar cerca del planeta. Las partículas neutras pueden quitar momento cinético del viento solar porque existe cierta probabilidad de que los protones del mismo gas solar efectúen colisiones con átomos de hidrógeno atmosférico en las que se transfiera la carga eléctrica de los primeros a los segundos. En estas colisiones, el electrón del átomo atmosférico se une al protón del viento solar y forma un nuevo átomo de hidrógeno, que se desplaza ahora con la velocidad del viento solar. Mientras tanto, el protón atmosférico resultante, que remplaza al del viento solar, se mueve con una velocidad mucho menor y refleja, por consiguiente, una pérdida efectiva del momento cinético incidente. Una pérdida adicional es producida también por los iones planetarios que contaminan al viento solar. Esto se debe a que conforme dichos iones se incorporan al movimiento del viento solar, utilizan parte de su energía cinética y así provocan que disminuya la velocidad incidente.

Aun cuando estos dos últimos mecanismos colaboren en la pérdida de momento cinético del viento solar, su participación no parece ser determinante de la dinámica del proceso de interacción que tiene lugar en la ionopausa de Venus. Afirmación que se apoya, por una parte, en la baja ($\lesssim 1$ %) densidad de partículas ionosféricas que contaminan el viento solar. Con tan bajas abundancias, el flujo de momento cinético que lleva la población contaminante es aproximadamente un orden de magnitud menor que el requerido para explicar el marcado decrecimiento de la velocidad del viento solar cerca de la ionopausa. Igualmente importante es el hecho de que el viento solar manifiesta, en esa región, características que no son compatibles con los efectos que producen las partículas contaminantes. Por ejemplo, la sustitución de los protones del viento solar por iones planetarios debe producir, además de la reducción de la velocidad, un enfriamiento neto del flujo. Esto se debe a que la temperatura de las partículas ionosféricas es aproximadamente dos órdenes de magnitud menor que las de los protones y electrones del viento solar. Por consiguiente, la incorporación de las partículas ionosféricas al viento solar debiera producir una disminución gradual de su temperatura.

Ocurre, sin embargo, que, cerca de la ionopausa, la temperatura del viento solar no disminuye; antes bien, muestra un aumento notable con respecto a los valores que se observan lejos del planeta. En este respecto conviene indicar, primero, que la temperatura de las partículas del gas solar incidente es del orden de 100.000 grados Kelvin. Al cruce del frente de choque que antecede a Venus, la temperatura del viento solar aumenta aun a mayores valores, pero posteriormente vuelve a disminuir conforme el gas solar se mueve alrededor del frente del planeta. Observaciones recientes realizadas con varios vehí-





3. REGISTRO MAGNETICO obtenido a lo largo de la trayectoria del vehículo *Pionero Venus* a su paso por la región de interacción del viento solar con la ionosfera diurna de Venus, al día 6 de diciembre de 1978. Las regiones de máxima intensidad magnética detectadas 4 minutos antes y 7 minutos después del periapsis (punto de máximo acercamiento al planeta) indican, respectivamente, la posición de la barrera magnética observada a la entrada y a la salida de la ionosfera. En ese intervalo (cuando el vehículo se encuentra dentro de la ionosfera), la intensidad magnética es sumamente baja por causa de la débil magnetización interna del planeta. Las discontinuidades observadas para un tiempo *t* de menos 26 min. y *t* mayor de 40 min. corresponden al cruce del satélite por el frente de choque. Movimientos repentinos de éste, producidos por cambios en la presión cinética del viento solar, pueden dar lugar a cruces múltiples como ocurrió para *t* por encima de los 40 min. En el diagrama inferior se muestra la trayectoria del *Pionero* proyectada sobre el plano perpendicular al de la eclíptica. El satélite se mueve en una órbita elíptica que es casi circunpolar; le permite un máximo acercamiento al planeta de unos 140 km. Se estima que el vehículo estará en funcionamiento hasta 1992 cuando caerá finalmente a la atmósfera de Venus.

culos espaciales muestran que, además de esta variación, la temperatura del gas solar experimenta un segundo aumento; esta vez en la vecindad de la ionopausa cerca del terminador. Este aumento ocurre en la región en donde se observa al viento solar fluir con bajas velocidades y, de hecho, existe una clara correlación entre ambos fenómenos. Así, el inicio de la caída gradual de la velocidad del viento solar en esa región coincide con un marcado aumento de su temperatura.

No podemos atribuir la termalización del viento solar en la vecindad de la ionopausa a los procesos de contaminación producidos por iones planetarios, pero sí es enteramente compatible con los efectos de una interacción viscosa en esa región. En el contexto de esta última interpretación se espera, por ejemplo, que parte de la energía cinética incidente se convierta en energía térmica de las partículas. El calentamiento producido obedece a que, en general, la interacción viscosa entre partículas de diferente velocidad da lugar a una cierta isotropización de la energía transferida. En el viento solar esto puede realizarse a través de fluctuaciones eléctricas y magnéticas turbulentas que, como se apuntó antes, sirven para transferir información entre las partículas.

Este razonamiento halla un fuerte apoyo en la observación de señales eléctricas de características turbulentas en la región comprendida entre el frente de choque y la ionopausa. Mediciones realizadas con detectores eléctricos a bordo del *Pionero Venus* indican que, fuera de la ionopausa, existe un ruido eléctrico incesante cuyo flujo de energía es comparable a la densidad de energía térmica de las partículas en esa región. Es muy probable que dichas fluctuaciones eléctricas reflejen el comportamiento turbulento del gas solar y que intercambien retroactivamente parte de su energía con la de éste.

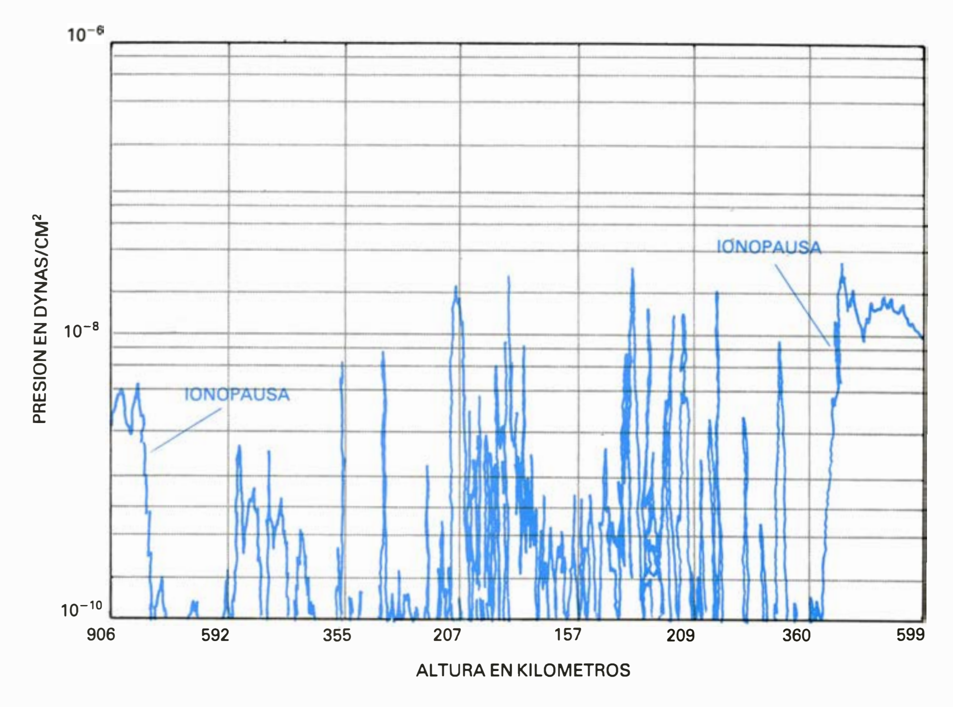
Existen, por otro lado, observaciones hechas dentro de la ionosfera de Venus que corroboran la existencia de procesos viscosos entre el viento solar y el material ionosférico. Se ha detectado que las partículas de capas superiores de la ionosfera tienden a desplazarse hacia el lado noche con velocidades de unos 3 km/seg. Por lo general, las velocidades observadas son mayores cerca de esta frontera y disminuyen gradualmente hacia abajo. El perfil de velocidad es, por tanto, similar al que se aprecia en el viento solar inmediato a la ionopausa y, de hecho, sugiere ser la extensión inferior de aquél. La transferencia de momento cinético del viento solar al material ionosférico por medio de procesos viscosos es compatible con estas observaciones, pues explica satisfactoriamente el origen de la energía requerida para establecer el movimiento de este último. Tal resultado obedece a que el flujo del momento cinético total dentro de la ionosfera de Venus es comparable con la pérdida de flujo de momento cinético que exhibe el viento solar por fuera de ella. En otras palabras, la cantidad total de energía cinética asociada al

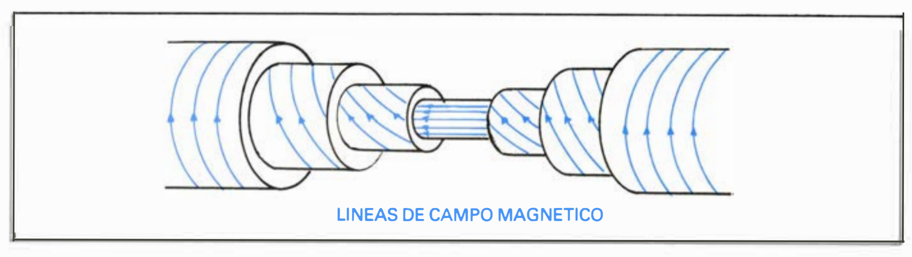
movimiento de partículas en la ionosfera superior de Venus vendría a ser la que el viento solar pierde a través de procesos viscosos.

La transferencia de momento cinético a la ionosfera superior no es la única interpretación que se ha dado al origen de su movimiento. Se ha propuesto, también, que el desplazamiento del material ionosférico hacia el lado noche resulta del hecho de que los procesos de fotoionización de la atmósfera neutra se producen únicamente en el hemisferio día. Esto es, siendo la radiación ultravioleta solar la responsable directa de la producción de iones atmosféricos, su concentración será siempre mayor en el lado día. En consecuencia, deberá esperarse un flujo continuo de partículas ionizadas hacia el hemisferio noche, en donde procesos de recombinación acaben por neutralizarlas. Aun cuando es claro que estos fenómenos contribuyen a establecer la distribución de partículas ionizadas en ambos hemisferios, la interpretación del movimiento observado como resultado de la diferente densidad ionosférica a través del terminador no es satisfactoria. Esto se debe a que las velocidades ionosféricas son mayores que la velocidad local del sonido y, por tanto, el transporte de partículas se hace bajo condiciones de flujo supersónico. Tal característica impone fuertes restricciones a los procesos que lo generan, pues ninguna diferencia en la concentración de iones planetarios entre los hemisferios día y noche puede dar lugar a velocidades de desplazamiento mayores que la velocidad del sonido. La única manera como dicha dificultad podría superarse es si se forzara a las partículas a pasar por una constricción geométrica (garganta), tal y como ocurre cuando el combustible de un cohete de reacción atraviesa una tobera de Laval. No hay indicios de que exista tal configuración dentro de la ionosfera de Venus y, por tanto, la aceleración que reciben las partículas tendrán que impartirla otros mecanismos.

Observaciones recientes del movimiento de partículas ionosféricas a menores alturas indican, además, otras discrepancias con respecto al que producen los procesos de fotoionización. Por debajo de los 200 kilómetros de altura, las partículas de la ionosfera muestran un movimiento similar al de las componentes neutras atmosféricas. Estas últimas se desplazan alrededor del planeta en un patrón de circulación al que se le conoce como movimiento de superrotación atmosférica. Este movimiento se realiza en el mismo sentido (retrógrado) de rotación de Venus, aunque con un período mucho menor. (Las partículas completan una revolución alrededor del planeta en un tiempo equivalente a unos 4 días terrestres, mientras que Venus da una vuelta sobre su eje aproximadamente cada 243 días.) El hecho de que las partículas ionizadas compartan el movimiento de superrotación implica la existencia de configuraciones de flujo radicalmente diferentes en regiones opuestas del terminador.

En la región cercana al meridiano del atardecer (definido de acuerdo con la rotación retrógrada del planeta), el movimiento de superrotación está dirigido del hemisferio día al hemisferio noche; así pues, coincide, en dirección, con el observado a mayores alturas. En la vecindad del meridiano del amanecer, el movimiento de superrotación está dirigido desde el hemisferio noche hacia el hemisferio día y, por tanto, es opuesto al observado cerca de la ionopausa. Significa ello que, en esta última región del terminador, ocurre una inversión en la dirección de movimiento del material ionosférico (hacia el Sol a bajas alturas y desde el Sol cerca de la ionopausa). Por dicha configuración sabemos que debajo de los 200 km de altura la velocidad de superrotación es por necesidad mayor que la que pudieran causar los procesos de fotoionización hacia el lado noche. De hecho, si no fuera ese el caso, no se observaría el movimiento de superrotación en esa región. Ahora bien, puesto que los procesos de fotoionización deben producir velocidades similares en las regiones bajas y altas de la ionosfera, y dado que la velocidad de





4. REGISTRO MAGNETICO obtenido al paso del vehículo *Pionero Venus* por el interior de la ionosfera diurna de Venus el día 7 de junio de 1979. A pesar de que la intensidad magnética general de la región es sumamente baja, se detectan a veces una serie de pulsos magnéticos angostos cuya configuración se ajusta a la representada esquemáticamente en el diagrama superior. La geometría de estos pulsos corresponde a la de una cuerda magnética en la que el ángulo de paso (inclinación) de cada línea de campo disminuye con la distancia al eje de simetría. La intensidad magnética también disminuye con esta distancia y se refleja en la diferente magnitud de los pulsos que detecta el *Pionero Venus*. Las cuerdas magnéticas se encuentran orientadas en todas direcciones y pueblan gran parte de la ionosfera diurna del planeta. Su origen parece estar relacionado con ciertas oscilaciones inestables de la barrera magnética exterior a la ionosfera. Como resultado de estas oscilaciones, las líneas de campo magnético del viento solar quizá se envuelvan unas con otras y desciendan, por convección, hasta el interior mismo de la ionosfera.

superrotación es apenas del orden de los 100 metros por segundo (correspondiente al período de 4 días antes indicado), podemos concluir que las velocidades del orden de 3 km/seg, observadas cerca de la ionopausa, no pueden deberse a efectos de fotoionización en el hemisferio día. La interpretación alternativa, que habla de procesos viscosos en esa frontera, es compatible con estos valores y, además, no está restringida por la inversión del perfil de velocidades detectada en la vecindad del meridiano del amanecer. Y ello es así porque, en tal interpretación, el momento cinético adquirido por el material ionosférico disminuye con la distancia desde la ionopausa, de tal manera que, a muy bajas alturas, llega a ser menor que el asociado al movimiento de superrotación.

Los resultados hasta aquí presentados han mostrado que el comportamiento fluido del viento solar es lo suficientemente eficaz como para permitir que parte de su momento cinético se transfiera viscosamente al material ionosférico en la vecindad del terminador. En lo que sigue se estudiarán observaciones de la ionosfera nocturna de Venus y de la estela que se extiende por detrás del planeta, que también revelan la existencia de procesos viscosos cerca de la región del terminador.

Desde que se inició el reconocimiento experimental de Venus, llamó la atención el hallazgo de concentraciones apreciables de partículas ionizadas en el hemisferio noche. Tales concentraciones fueron en buena medida inesperadas porque, en virtud de la lenta rotación del planeta, las partículas ionizadas pasan mucho tiempo en la oscuridad y, por tanto, se suponía que serían neutralizadas casi totalmente por procesos de recombinación. Ello no obstante, las observaciones realizadas con los vehículos espaciales indican que la densidad de partículas ionosféricas presentes en el hemisferio nocturno es una fracción apreciable de las que se observan en el hemisferio diurno. Según se sabe hoy día, el mantenimiento de la ionización presente en el lado noche se debe, en buena medida, al movimiento general de la ionosfera superior hacia ese hemisferio. Con tal movimiento se remplazan, de manera continua, las partículas que se pierden por los procesos de recombinación.

Con independencia de su origen, la ionosfera nocturna de Venus se distingue también por las características de su distribución espacial, así como por su comportamiento. El rasgo más importante de su morfología es el hecho de que esté también acotada por una frontera superior, o ionopausa, similar a la que se observa en el lado día. Mediciones realizadas con el *Pionero Venus* indican que el perfil de densidad de partículas ionosféricas en el hemisferio noche muestra un decrecimiento muy parecido al de la ionosfera diurna. Como en aquel caso, la ionosfera nocturna también termina abruptamente a una cierta altura y parece, asimismo, estar comprimida desde el exterior. Tal fenómeno no puede, en principio, achacarse a la presión ejercida por el viento solar, pues éste no incide directamente sobre el hemisferio noche. Ocurre, sin embargo, que las condiciones presentes en la región del terminador pueden dar lugar a que se produzcan efectos que resulten en la compresión de la ionosfera nocturna. Puesto que tales efectos parecen ser también responsables de su geometría y estructura interna, conviene describir, primero, las observaciones relativas a estas últimas y, posteriormente, examinar los procesos que controlan la dinámica general de la región.

De las observaciones realizadas con el *Pionero Venus* se ha establecido que, además de mostrar una frontera superior, la ionosfera nocturna varía en el tiempo. Así, en ocasiones, la ionopausa en ese hemisferio se detecta apenas a unos cuantos cientos de kilómetros de la superficie y en otros a más de 3000 km de altura. Igualmente notable es la aparente dependencia que existe entre la posición de la ionopausa nocturna y el valor de la densidad de la energía cinética del viento solar incidente. Como es el caso en el hemisferio diurno, la ionosfera nocturna tiende a ocurrir a menores alturas a medida que esta cantidad aumenta. En el lado día, tal variación obedece a la mayor compresión ejercida por el viento solar, pero es claro que el mismo concepto no es directamente aplicable al lado noche.

Además de la variación con la energía cinética del viento solar, la posición de la ionopausa nocturna muestra una fuerte distorsión espacial. Se observa que, incluso para valores iguales de la energía cinética del viento solar, la ionopausa en el hemisferio noche tiende a ocurrir a mayores alturas a menores latitudes, y, a menores alturas, a altas latitudes. Del estudio estadístico de tal variación se ha deducido la existencia de una prominencia, o deformación global de la ionosfera, que se extiende por detrás de la región del terminador. Dicha prominencia destaca más a bajas latitudes y desaparece prácticamente en las regiones polares. Por su geometría, diríase que el material ionosférico hubiese sido arrastrado desde los polos hacia el plano ecuatorial por detrás del planeta. De hecho, la creciente altura de la ionopausa nocturna conforme se baja en latitud sugiere que es en los polos en donde se inicia su deformación. Esta idea se ha utilizado para examinar las condiciones que prevalecen en las regiones polares y, en particular, la posible conexión que éstas tengan con la formación de la ionopausa nocturna; es decir, con la terminación abrupta de la ionosfera en el lado noche.

Existen, en este respecto, varias razones que indican que el proceso de interacción entre el viento solar y el material ionosférico en las regiones polares debe mostrar características especiales. La más importante es que la barrera magnética que se forma delante de la ionopausa diurna debe de ser muy débil en esas regiones. Esto se debe a que, en general, las líneas de campo magnético del viento solar están orientadas sobre el plano de la eclíptica, que coincide aproximadamente con el plano ecuatorial de Venus.

Así, la acumulación de líneas de campo magnético alrededor de la ionosfera diurna ocurrirá preferentemente a bajas y moderadas latitudes, en donde chocan de lleno con ella. No es este el caso cerca de las regiones polares, en donde las líneas de campo magnético pasan casi rasantes por el planeta y, por tanto, sin acumularse alrededor del obstáculo ionosférico. Esto quiere decir que en esas regiones no debe esperarse un aumento notable en la intensidad del campo magnético por arriba de la ionopausa, sino únicamente valores comparables con los que se observan en el viento solar lejos de la región de interacción. Tal resultado nos señala que, cerca de las regiones polares, el proceso de interacción entre las partículas del viento solar y las de la ionosfera poseerá un carácter más hidrodinámico que a bajas latitudes. Ello obedece a que, en presencia de un campo magnético menos intenso en la ionopausa polar, deberá haber un mayor contacto entre las dos poblaciones de partículas y, por tanto, condiciones más turbulentas.

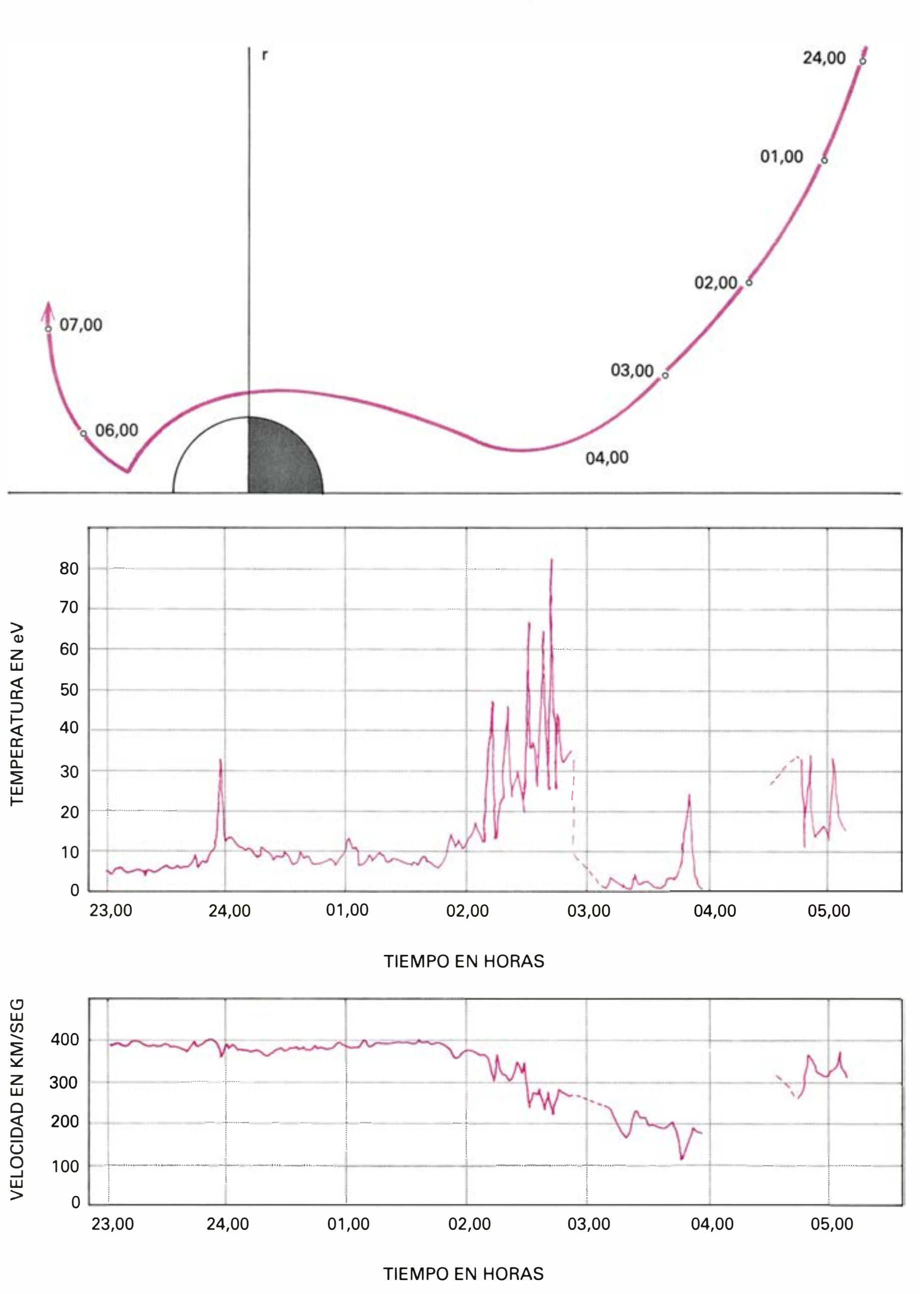
Armados de estos razonamientos podremos evaluar el rendimiento de procesos que, como los viscosos, dependen de tales condiciones. Podemos sugerir,

pues, que es en las regiones polares en donde la interacción viscosa entre las partículas del viento solar y las de la ionosfera será más fuerte. En esas regiones ocurrirá un mayor arrastre de las partículas ionosféricas hacia el lado noche y una más notable disminución de la velocidad del viento solar. Por el contrario, la presencia del campo magnético acumulado alrededor de la ionopausa a bajas latitudes reducirá el rendimiento del proceso viscoso. Ello ocurre porque las líneas de campo magnético tienden a estabilizar el movimiento de las partículas que ahí se encuentran y, por tanto, a reducir la transferencia de momento cinético a la ionosfera.

El hecho de que los procesos viscosos se lleven a cabo preferentemente en las regiones polares, en donde el campo magnético alrededor de la ionopausa es menos intenso, da lugar a que se produzca un fenómeno cuyos efectos parecen ser determinantes de la configuración de la ionosfera nocturna. El calentamiento que sufren las partículas del viento solar al interaccionar viscosamente con el material ionosférico en la región de terminador conduce a un aumento local de la presión.

Este incremento produce la expansión del gas solar en esa región y, como consecuencia, que tienda a desplazarse hacia el interior de la umbra planetaria. A bajas latitudes, la presión magnética de las líneas de campo acumuladas alrededor de la ionosfera impide esa expansión, pero en las regiones polares, donde no existe este impedimento, el gas solar se mueve con libertad y entra de lleno en el interior de la cavidad que las mismas líneas de campo magnético forman a bajas latitudes por detrás del planeta. Con el objeto de visualizar mejor este concepto se debe hacer notar que el aspecto que presenta Venus, con las líneas de campo magnético del viento solar detenidas delante de la ionosfera diurna, y extendiéndose por los lados hacia atrás del terminador, es similar al de una esfera colocada sobre un cilindro hueco cuya sección transversal coincide con el de la esfera. La pared del cilindro representa el conjunto de líneas de campo magnético que, al ser arrastradas por el viento solar, quedan colgadas en el planeta y se extienden indefinidamente hacia atrás. Ahora bien, debido a que en las regiones polares de Venus la acumulación de líneas de campo magnético es muy débil, es necesario suponer que existe, sobre el cilindro, una apertura longitudinal que parte de cada una de las regiones polares de la esfera, y que es a través de tales aperturas por donde hay acceso al interior del cilindro.

La dinámica que sugiere esa geometría es concorde con las características que muestra la ionosfera nocturna de Venus. Por ejemplo, el arrastre que las partículas del viento solar producen sobre la ionosfera polar permite también que se genere un flujo de partículas ionosféricas dirigido desde la región del terminador polar hacia el ecuador, por detrás del planeta. Dicho flujo puede explicar la formación de la prominencia ionosférica nocturna, porque el material ionosférico se distribuirá también lateralmente (en azimut) a medida que se ve arrastrado hacia el plano



5. PERFILES DE VELOCIDAD Y TEMPERATURA del viento solar medidos a lo largo de la trayectoria del vehículo soviético *Venera 9* en la estela de Venus el día 19 de abril de 1976. El aumento en la temperatura que se inicia cerca de las 0200 horas se ajusta bastante con el principio de un decrecimiento continuo en el perfil de la velocidad. Este comportamiento es característico de los fenómenos viscosos, en los que parte de la energía cinética del flujo incidente se convierte en energía térmica a través de procesos disipativos. La discontinuidad en la temperatura, que se observa cerca de las 0300 horas, corresponde al cruce del *Venera 9* por la frontera que delimita las líneas de campo magnético del viento solar acumuladas alrededor de la ionosfera diurna, que se extienden por detrás del planeta. Por fuera de esa frontera se mueve el viento solar cuya temperatura refleja el calentamiento producido por su interacción con la ionosfera de Venus. Por debajo de esa frontera se tiene las partículas ionosféricas arrastradas por el mismo viento solar. En la parte superior de la figura se muestra la proyección de la trayectoria de *Venera 9* en un plano en el que la coordenada vertical representa la distancia medida desde el vehículo hasta el eje Sol-Venus. La órbita de *Venera* estuvo orientada cerca del plano de la eclíptica. Ello le permitió cruzar a menudo las regiones de baja latitud de la barrera magnética que se extiende por detrás del planeta.

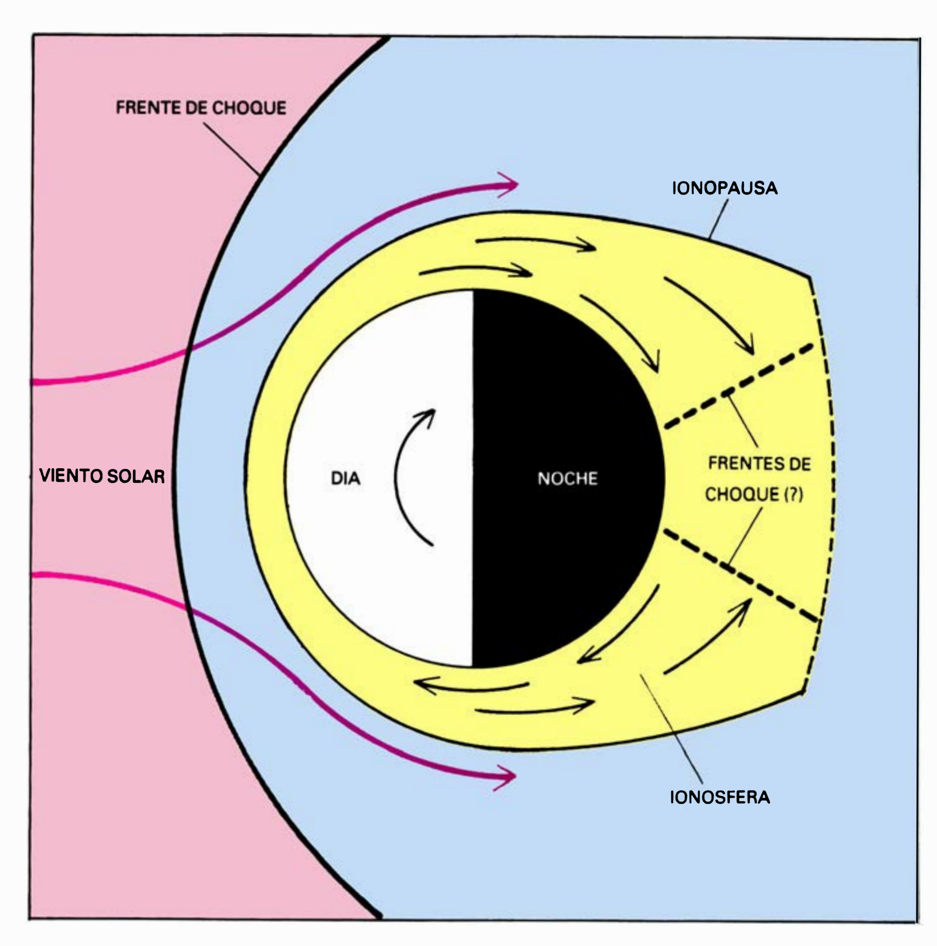
ecuatorial. Este movimiento hace que las partículas de la ionosfera polar se alejen gradualmente del planeta conforme bajan en latitud y, por tanto, que alcancen grandes alturas cerca del ecuador. Según se describió antes, tal es la característica principal de la prominencia ionosférica observada en el hemisferio noche de Venus.

La entrada del viento solar en el interior de la umbra planetaria produce, además del arrastre de la ionosfera polar, un efecto que resulta ser esencial para entender el origen de la ionopausa nocturna. Ocurre que, al desplazarse en esa dirección, las partículas del viento solar arrastran también a las líneas de campo magnético acumuladas en la vecindad de las regiones polares (en donde la intensidad magnética no es muy alta). Tales líneas de campo son así forzadas hacia las partes más internas de la umbra dándole a esa región un carácter esencialmente magnético. Se espera, por ejemplo, que sean esas líneas de campo las que confinen la ionosfera nocturna, pues quedarán atrapadas entre ésta por debajo y el gas solar que las empuja por arriba. Este fenómeno justifica la existencia de la ionopausa en el lado noche, es decir, explica por qué el material ionosférico en ese hemisferio termina abruptamente en una frontera superior. Dicha frontera se debe simplemente a la compresión que las líneas de campo magnético, que han sido forzadas hacia la umbra, ejercen sobre el material ionosférico nocturno.

Existen, por otra parte, interpretaciones alternas de la formación de la ionopausa nocturna basadas en los efectos de tensión magnética a lo largo de las líneas de campo que pasan sobre las regiones polares. El desplazamiento de las partículas del viento solar hacia el interior de la umbra se debe, en este caso, al movimiento helicoidal que siguen a lo largo de las líneas de campo magnético. Estas últimas pueden estar orientadas hacia el interior de la umbra y, por tanto, guiar las partículas en esa dirección. Aun cuando tales efectos son compatibles con la formación de la prominencia ionosférica nocturna a bajas latitudes, su participación no parece ser determinante del comportamiento de las partículas en la umbra. Esto se pone de manifiesto, por un lado, porque tal interpretación no explica el aumento en la temperatura del gas solar cerca de la ionopausa y, por otro, porque del análisis de los datos obtenidos con el *Pionero Venus* se ha establecido que el movimiento de las partículas hacia el interior de la umbra procede incluso cuando el campo magnético no está orientado en esa dirección.

En consecuencia, es necesario suponer que el movimiento del gas solar atrás del terminador no está controlada por la geometría magnética; antes bien, es esta última la que se ajusta al proceso de expansión: el flujo de partículas del viento solar hacia la umbra determina la configuración magnética en esa región. De lo aquí expuesto se puede concluir, por tanto, que toda la ionosfera del planeta Venus parece estar forrada por las líneas de campo magnético del viento solar. En el hemisferio día la ionosfera está cubierta por las líneas de campo que quedan detenidas delante del planeta al desviarse el gas solar alrededor de ella; en el hemisferior noche, por las líneas de campo que la expansión del viento solar en las regiones polares desvía hacia la umbra.

Además de su geometría tan notable la ionosfera nocturna de Venus muestra una estructura interna sumamente variable y compleja. De las observaciones realizadas con el *Pionero Venus* se han identificado regiones dentro de ella, en donde la densidad de partículas ionizadas cae a valores comparables con los presentes en el viento solar. Estas regiones semejan agujeros que se extienden desde la ionopausa hasta muy bajas alturas dentro de la ionosfera. La posición de dichos agujeros, aunque muy variable, puede situarse cerca del meridiano noche (preferentemente entre las 23 y las 2 horas locales) y entre los 20° y 40° de latitud a ambos lados del ecuador. Por otra parte, los agujeros ionosféricos suelen observarse pares (uno en el hemisferio norte y otro en el hemisferio sur). Su grosor, medido a lo largo de la trayectoria del *Pionero Venus* es del orden de



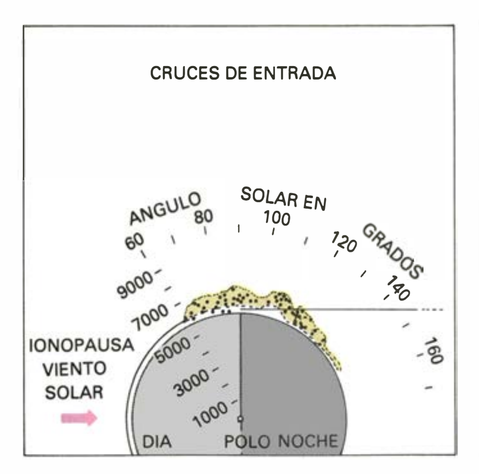
6. PATRON GENERAL DE MOVIMIENTO en el plano de la eclíptica dentro de la ionosfera de Venus. A bajas alturas, el material ionosférico comparte el movimiento de superrotación que tienen las componentes neutras atmosféricas. Aunque este movimiento procede en el mismo sentido de rotación (retrógrado) del planeta, se lleva a cabo en un período mucho más corto (equivalente a 4 días terrestres). A mayores alturas, el material ionosférico avanza siempre del hemisferio día al hemisferio noche, arrastrado por el viento solar que fluye por fuera. El movimiento de la ionosfera superior, que se realiza bajo condiciones de flujo supersónico requiere de la existencia de un frente de choque en las regiones más internas de la umbra en donde el material es finalmente desacelerado. Observaciones realizadas con el *Pionero Venus* indican que las partículas ionosféricas en esa región muestran características compatibles con los efectos producidos por tal transición; allí, por ejemplo, el material muestra temperaturas más altas que las observadas en el resto de la ionosfera. La superposición de dos movimientos dentro de la ionosfera (el de superrotación a bajas alturas y el que está dirigido hacia el hemisferio noche en la ionosfera superior) produce cierta desviación lateral de las líneas de flujo que convergen en el lado noche.

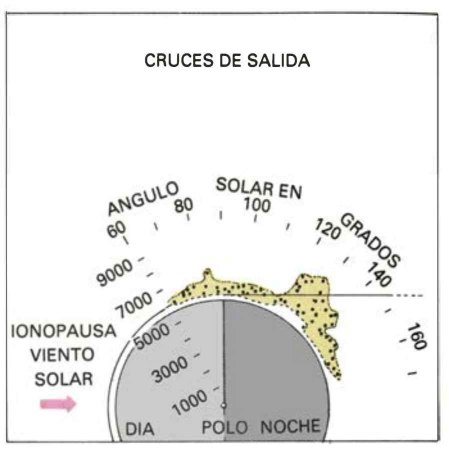
unos 1500 kilómetros. Junto con la caída de la densidad de partículas ionizadas, los agujeros ionosféricos se caracterizan por un aumento conmensurable en la intensidad local del campo magnético. De hecho, a diferencia del resto de la ionosfera, existe dentro de los agujeros ionosféricos un campo magnético apreciable, orientado preferentemente en la dirección vertical. Es muy probable que tales flujos magnéticos estén conectados con los que forman la cola magnética del planeta, la cual se extiende hasta grandes distancias por detrás del mismo.

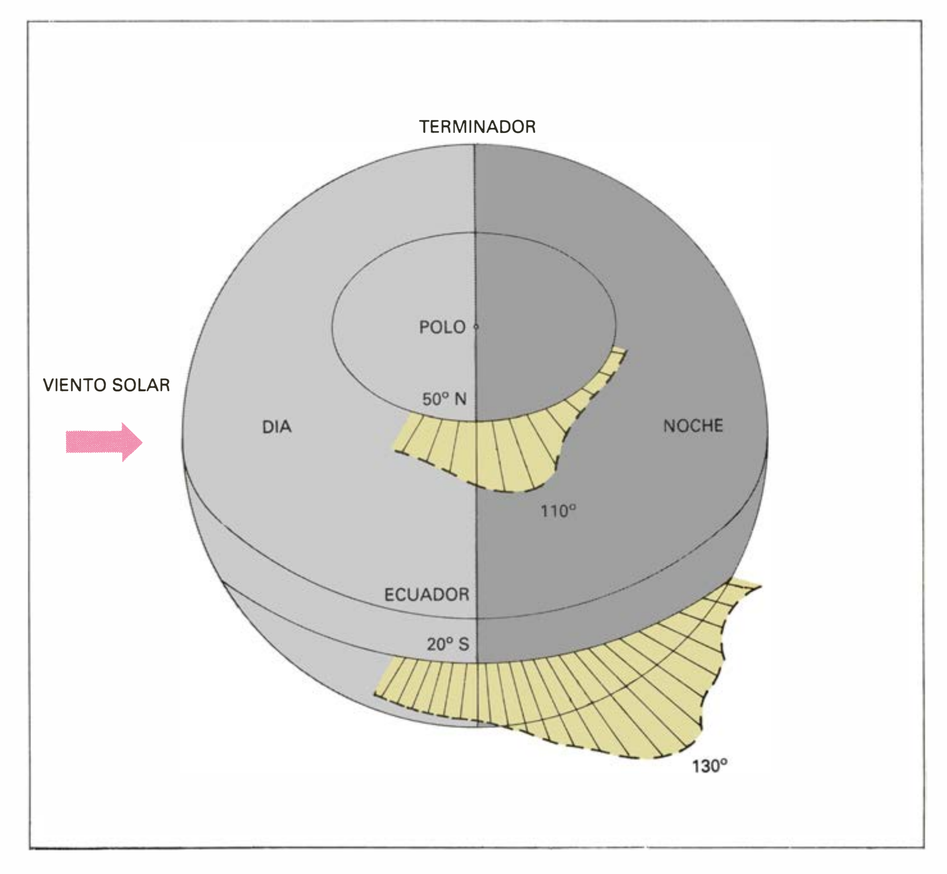
La identificación del origen y de la formación de los agujeros ionosféricos constituye, en la actualidad, tema de intensos estudios teóricos y experimentales. Se ha propuesto, por ejemplo, que los flujos magnéticos presentes en su interior evidencian un débil campo magnético planetario cuyas líneas de fuerza son deformadas y arrastradas hacia el lado noche por el movimiento general de la ionosfera superior en esa dirección. Alternativamente, es posible que la mayor intensidad magnética que los caracteriza esté relacionada con la que se da en la barrera magnética exterior a la ionopausa diurna. En este caso, la penetración ocasional de flujos magnéticos del viento solar en el interior de la ionosfera por la región del terminador polar pudiera formar los agujeros ionosféricos. Se debe señalar, en este sentido, que los efectos del arrastre viscoso producido por el viento solar sobre el material ionosférico en esa región pudieran controlar directamente la manera como se obliga a los flujos magnéticos de la barrera a introducirse en la ionosfera nocturna.

Una posibilidad contemplada hoy es que variaciones temporales de la presión cinética del viento solar produzcan incrementos repentinos de la erosión del material ionosférico y que éstos, a su vez, den lugar a que partes de la barrera magnética en la región del terminador polar queden sepultadas temporalmente por el mismo material ionosférico arrastrado hacia ahí. Tales flujos magnéticos podrían ser luego trasladados hacia el interior de la umbra por el movimiento general de la ionosfera superior en esa dirección. La geometría del campo magnético que se infiere de estas ideas es similar a la observada en los agujeros ionosféricos, pero es claro que una descripción más adecuada de su distribución requiere de observaciones más precisas.

Según los datos del *Pionero Venus*, la erosión impulsiva del material ionosférico, particularmente en la región del terminador polar, produce irregularidades que se manifiestan en una compleja estructura en esa región. Se detectan, por un lado, ondulaciones espaciales de la ionopausa y, por otro, concentraciones ionosféricas exteriores a ellas. A estas últimas estructuras se les conoce como nubes ionosféricas; su posición en el espacio sugiere que representan una fase posterior al de las primeras en el proceso de erosión impulsiva del material ionosférico. Se supone que, bajo la acción de cambios repentinos en la presión cinética del viento solar, la ionopausa puede efectuar oscilaciones inestables de gran amplitud que produzcan la ruptura y separación de grandes masas de material ionosférico. Estas masas pueden quedar aisladas







7. POSICION DE LA IONOPAUSA NOCTURNA de Venus detectada en las primeras 50 órbitas del vehículo espacial *Pionero Venus*. La distribución de puntos en las dos gráficas superiores representan la entrada (a los 50 grados de latitud norte) y la salida (a los 20 grados de latitud sur) del satélite a su paso por la ionosfera. La notable variación de la altura de la ionopausa con el ángulo solar, según se infiere de los datos a bajas latitudes, revela la existencia de una deformación o prominencia de la ionosfera nocturna, que se extiende por detrás del planeta. El aspecto de esta prominencia en tres dimensiones se muestra esquemáticamente en el diagrama inferior con barras verticales para indicar su configuración en las dos latitudes examinadas. La mayor altura de la prominencia a bajas latitudes sugiere que el fenómeno que la produce se origina desde las regiones polares. Este puede deberse al movimiento de partículas ionosféricas procedentes de esas regiones que, al bajar en latitud, se van alejando gradualmente del planeta.

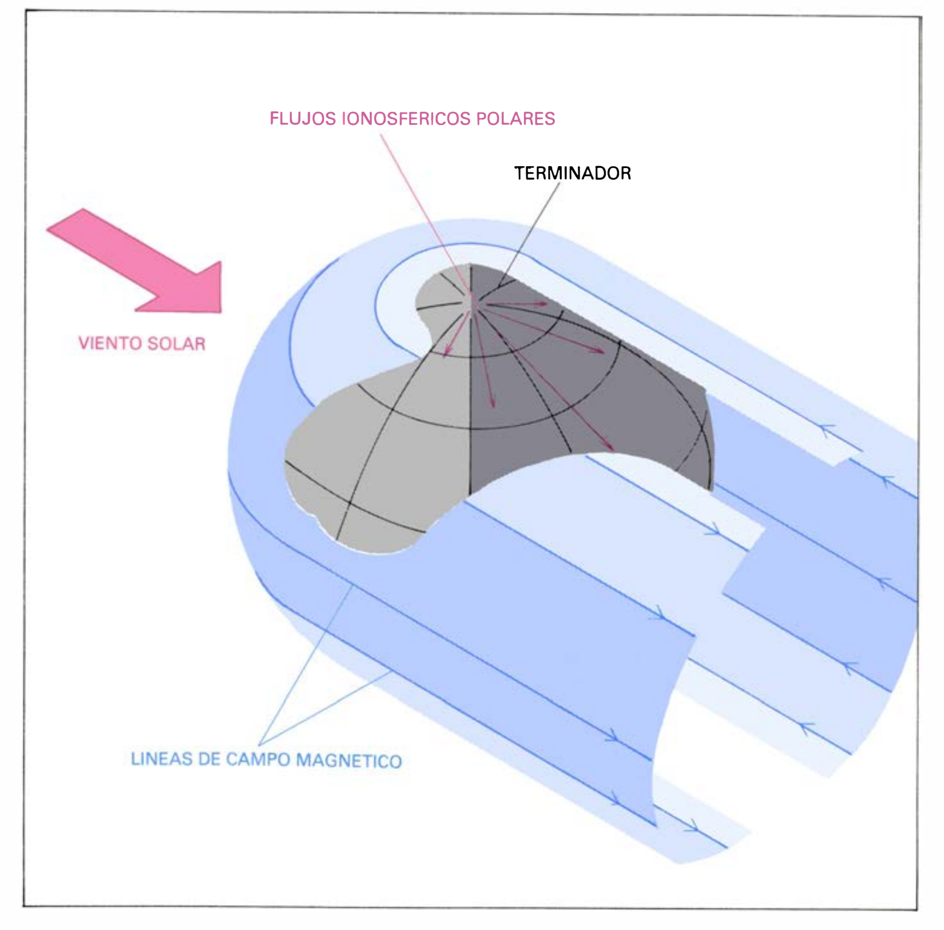
del resto de la ionosfera y aparecer como nubes que son arrastradas por el viento solar. De las observaciones realizadas no se ha podido esclarecer si tales nubes ionosféricas tienen una geometría celular o forman parte de estructuras alargadas conectadas en algún punto con la ionosfera de Venus.

Por lo general, las nubes ionosféricas aparecen en los registros del *Pionero Venus* como regiones de unos 1500 kilómetros de diámetro con una densidad aproximada de 1000 partículas por centímetro cúbico, similar a la densidad observada en las capas superiores de la ionosfera nocturna. Asimismo, es muy probable que, debido al arrastre producido por el viento solar, el material dentro de las nubes ionosféricas se desplace con velocidades de unos 5 a 10 km/seg. Se ha informado, por otra parte, que la detección de nubes ionosféricas no es muy frecuente. (Aparecen aproximadamente en uno de cada cinco pases del vehículo *Pionero Venus* por la ionosfera nocturna del planeta.) Sin embargo, la cantidad de partículas que contienen dichas nubes es lo suficientemente grande como para representar una pérdida importante de material ionosférico; sobre todo si se advierte que tal proceso debe haber estado operando desde que se formó Venus. Se estima que la erosión impulsiva de su ionosfera a través de la formación de nubes ionosféricas bien pudo haber tenido consecuencias importantes en la evolución de la composición de su atmósfera. Se ha calculado, por ejemplo, que la pérdida total de iones de oxígeno e hidrógeno, constituyentes dominantes de las capas superiores de la ionosfera venusina equivale al material que contiene un océano de agua cuyo volumen sea de un millón de kilómetros cúbicos. Estos números ilustran la necesidad de descifrar los procesos que controlan la dinámica de la interacción del viento solar y la ionosfera de ese planeta.

La separación de grandes masas de material ionosférico en forma de nubes no es sino un tipo de erosión más que sufre la ionosfera de Venus. El viento solar produce, además, una pérdida menos tangible pero más uniforme de partículas ionosféricas que se le incorporan y lo contaminan. De esta población de iones planetarios contaminantes nos ocupamos antes al hablar de los factores que contribuyen a explicar la deficiencia de momento cinético del viento solar en la región inmediata a la ionopausa. Según se apuntó entonces, la densidad de iones planetarios que se mueven con velocidades comparables a la del viento solar es aproximadamente del 1 por ciento de la densidad local del último y, por tanto, varios órdenes de magnitud menor que las densidades observadas en las nubes ionosféricas. En tales condiciones, la componente de iones planetarios incorporados en el viento solar no representa una pérdida apreciable del material ionosférico, como lo es el contenido en las nubes ionosféricas que se desplazan a velocidades menores.

Con independencia de su densidad, la presencia de iones planetarios asimilados al viento solar ha demostrado ser crítica en el estudio de los procesos que producen el arrastre del material ionosférico. Tales iones se mueven con velocidades, y a lo largo de direcciones, que coinciden con las del viento solar. Mediciones realizadas en la estela del planeta (a varios miles de kilómetros por detrás de él) indican que las partículas planetarias siguen a las del viento solar sin depender de la orientación local del campo magnético.

Este resultado revela que el campo magnético no influye directamente en el movimiento de dichas partículas. Téngase en cuenta que en diversos estudios teóricos de la incorporación de partículas ionosféricas al viento solar se había propuesto que su movimiento debiera estar dominado por campos eléctricos (convectivos) producidos por su diferente velocidad con respecto a la del viento solar. Dichos campos eléctricos producen aceleraciones a lo largo de direcciones que dependen de la orientación local del campo magnético. Dentro de este esquema se espera, por tanto, que la dirección de movimiento de las partículas planetarias en el viento solar esté correlacionada con la orientación del campo magnético, y que los

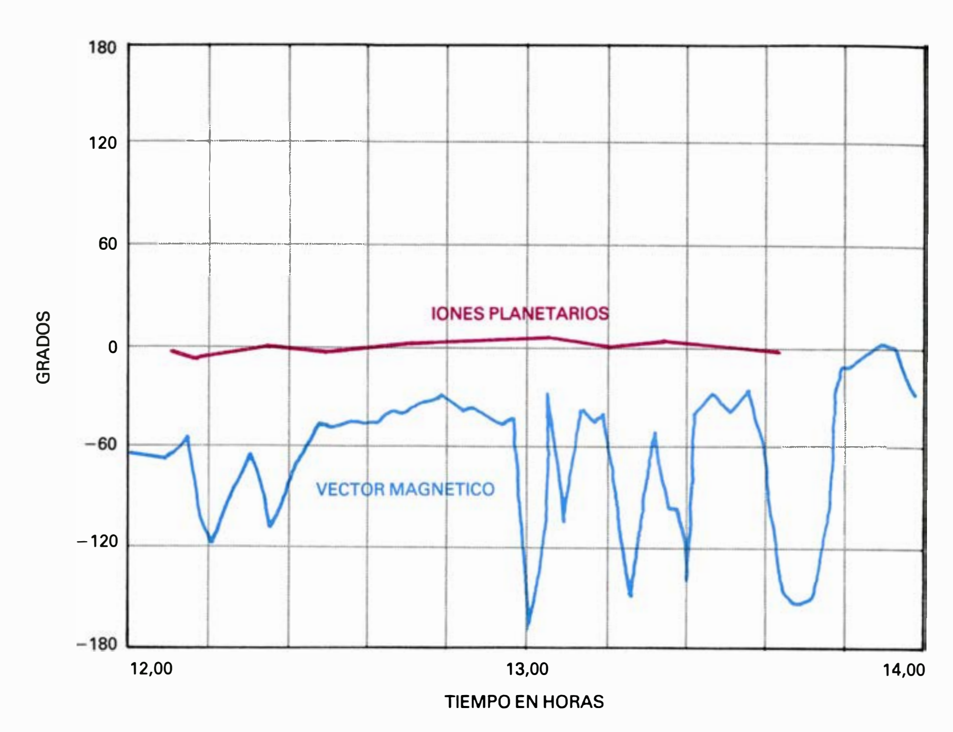


8. MORFOLOGIA DE LA BARRERA formada por las líneas de campo magnético del viento solar que se acumulan alrededor de la ionosfera diurna de Venus. En las regiones polares no hay tal acumulación de líneas y, en consecuencia, el gas solar interacciona directamente con el material ionosférico. En esas regiones se desarrolla un mayor arrastre viscoso de las capas superiores de la ionosfera. En virtud del mismo, el viento solar se desacelera, se calienta y se expande hacia el interior de la umbra forzando hacia adentro las partes de la barrera magnética cercanas a los polos. Este desplazamiento origina una compleja configuración magnética dentro de la umbra, que varía, además, con el tiempo. El movimiento de arrastre del material ionosférico hacia atrás del planeta, indicado con el abanico de vectores desde el polo hacia el ecuador, es responsable de la formación de la prominencia ionosférica nocturna. Esta se extiende hasta la intersección de los vectores con la pared del cilindro que representa la barrera posterior.

cambios en esta última, detectados a lo largo de la trayectoria del vehículo *Pionero Venus* reflejen, necesariamente, cambios en la primera. Al no observarse ese comportamiento en los datos experimentales, habrá que pensar que son otros los procesos que controlan el movimiento de las partículas ionosféricas.

La existencia de condiciones turbulentas en el viento solar, causadas por la presencia de los iones planetarios que lo contaminan, proporciona una interpretación más adecuada de los resultados experimentales. Recuérdese que las fluctuaciones turbulentas de los campos eléctricos y magnéticos del viento solar actúan como centros dispersores que obligan a las partículas a efectuar movimientos estocásticos como si éstas estuvieran sujetas a colisiones efectivas entre ellas. En virtud de ese comportamiento, se establece un contacto estrecho entre las partículas ionosféricas y las del viento solar, tal y como ocurre cuando una población de partículas contaminantes se agrega a un fluido convencional. En estas condiciones, los iones planetarios acaban desplazándose en la misma dirección y con la misma velocidad del viento solar. Esta explicación aclara por qué otro tipo de movimientos, como el debido al campo eléctrico convectivo y dependiente de la orientación local del campo magnético, no pueden llevarse a cabo. Tales movimientos se ven interrumpidos en las complicadas trayectorias estocásticas de las partículas ionosféricas y esto, a su vez, impide cualquier correlación con la orientación del campo magnético.

De las características del desplazamiento de las partículas ionosféricas observadas en la estela de Venus se puede concluir, por tanto, que su asimilación al viento solar debe ser producto de un continuo intercambio de información entre ambas poblaciones; y que éste debe realizarse a través de fluctuaciones turbulentas causadas por la misma presencia de los iones planetarios en el viento solar. Según se indicó antes, este comportamiento parece ser responsable también de la transferencia viscosa de momento cinético que tiene lugar en la ionopausa de Venus.

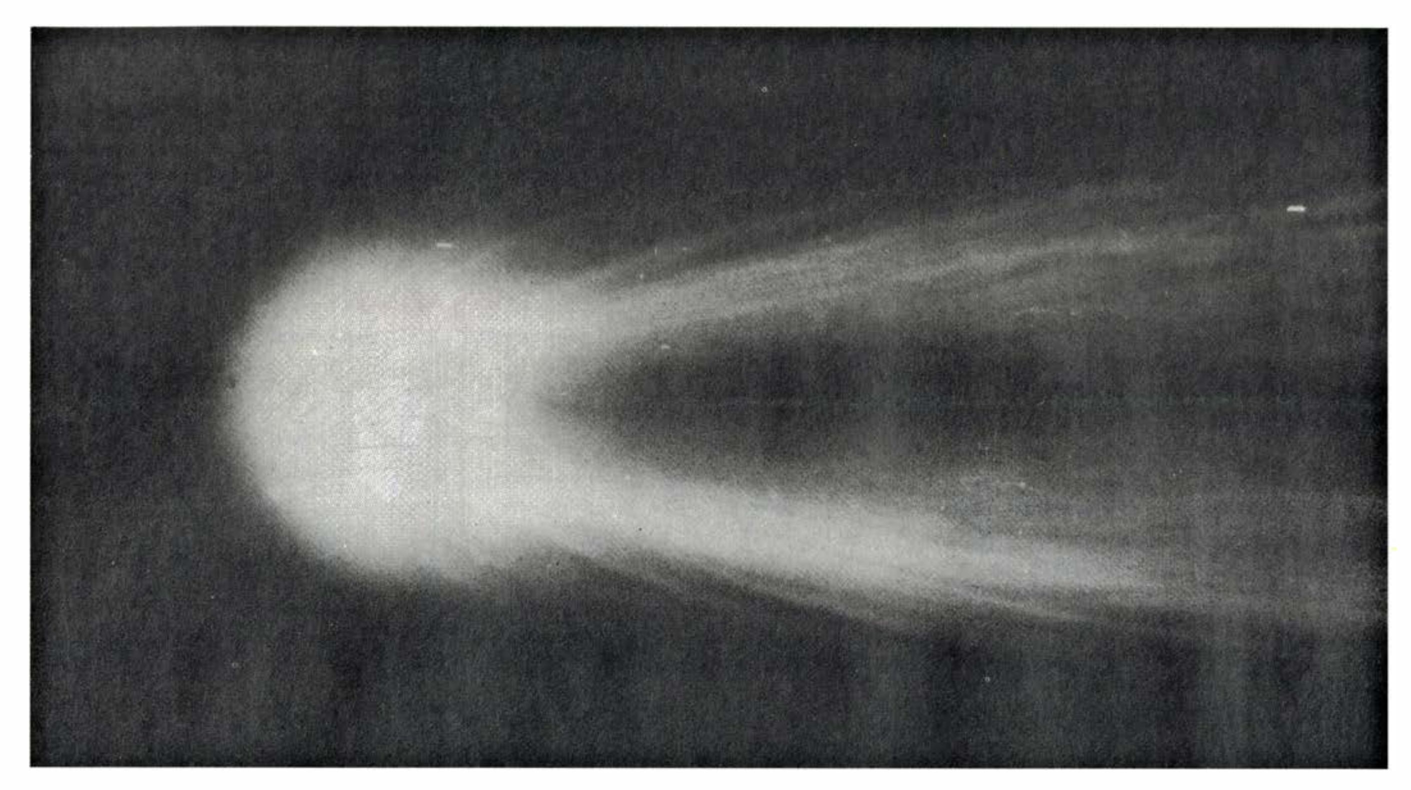


9. DIRECCION DEL MOVIMIENTO de las partículas ionosféricas incorporadas al viento solar, comparada con la orientación local del campo magnético en la estela de Venus. Muestra la gráfica que esas partículas no se mueven a lo largo de las líneas de campo magnético y que su dirección es independiente de la orientación del vector magnético. La coordenada vertical indica el ángulo azimutal medido (sobre la eclíptica) con respecto al eje Sol-Venus. La coordenada horizontal marca, a su vez, el tiempo durante el cual el *Pionero Venus* cruzó la estela de Venus (a unos 50.000 kilómetros por detrás del planeta) el día 11 de junio de 1979. La traza correspondiente a los iones de oxígeno, característicos de las capas superiores de la ionosfera de Venus, señala que éstos se mueven prácticamente en la misma dirección del viento solar (paralela al eje Sol-Venus). El vector magnético apunta orientaciones diferentes que no se reflejan en cambios en la dirección de movimiento de las partículas ionosféricas. Tal comportamiento es contrario al propuesto en teorías de aceleración convectiva de estas partículas, y revela la acción de interacciones efectivas entre ellas y las del viento solar. Fluctuaciones turbulentas causadas en el viento solar por las mismas partículas ionosféricas contaminantes deben ser, en última instancia, las responsables de la eficiente transferencia de momento cinético que opera entre ambas poblaciones de partículas.

La observación de que el viento solar y las partículas ionosféricas incorporadas en él se muevan en la misma dirección es un resultado experimental de profundas consecuencias para la interpretación de otros fenómenos astrofísicos. De particular importancia es la dinámica de las estructuras filamentarias, llamadas rayos, que conforman cierto tipo de colas de los cometas. Con el objeto de fundamentar la relevancia de la fenomenología del proceso de interacción que tiene lugar entre el viento solar y la ionosfera de Venus, en el estudio de la que ocurre en la vecindad de un cometa es necesario señalar, primero, que ambos problemas tienen una gran similitud. Los cometas actúan también como objetos atmosféricos desprovistos de un campo magnético interno apreciable que los proteja de la acción del viento solar. En tales condiciones, el proceso de interacción con las capas superiores de su ionosfera será similar al que ocurre en Venus. Así, se espera que la ionosfera cometaria esté acotada por una frontera superior o ionopausa; y que, por encima de ella, el campo magnético arrastrado por el viento solar se acumule formando una barrera magnética de características parecidas a las de la observada en Venus.

Existen, claro está, diferencias notables, cualitativas y cuantitativas, en la posición y configuración de la región de interacción, así como en su comportamiento frente a las variaciones temporales de la presión cinética del viento solar. Sin embargo, la naturaleza similar de los procesos que tienen lugar en ambos casos nos permiten utilizar ciertas nociones que son de validez general. Nos referimos, en particular, al movimiento de iones de origen cometario que son arrojados al espacio y asimilados posteriormente por el viento solar. Tal movimiento debe ser análogo al mostrado por los iones planetarios en la vecindad de Venus y de hecho puede decirse que, cualquiera que sea su origen, la incorporación de iones contaminantes al viento solar se producirá bajo las mismas condiciones y provocará un mismo tipo de comportamiento.

En el caso de los iones cometarios, se sabe que, al interaccionar con el viento solar, se distribuyen en delgadas formas filamentarias de gran extensión que tienden a congregarse en la cola misma del cometa. En realidad, ello ocurre alrededor de lo que se conoce como cola de plasma (tipo I), formada



10. INTERACCION DEL VIENTO SOLAR con los cometas. Se lleva a cabo bajo condiciones similares a las que se observan en Venus. La ausencia de un campo magnético apreciable que sea intrínseco al núcleo cometario debe dar lugar a que el viento solar también incida directamente sobre las capas superiores de su ionosfera. Como en Venus, esto conducirá a la formación de una barrera magnética alrededor de ella; se producirán, asimismo, nubes ionosféricas que pueden ser arrastradas por el mismo viento solar. Las delgadas estructuras filamentarias (rayos) de material ionizado, que se extienden por detrás de los cometas, quizá tengan el mismo origen que las nubes ionosféricas de Venus. En esta fotografía de la cabeza del cometa Halley (tomada en 1910) se aprecia un conjunto de rayos que parten de la región nuclear y tienden a congregarse en su cola. De las observaciones en Venus se infiere que es probable que las partículas que forman los rayos cometarios no se desplacen a lo largo de las líneas de campo magnético arrastradas por el viento solar.

por el material ionizado del cometa; la cual difiere, en dirección, de la cola de material neutro (tipo II) arrastrado por la radiación electromagnética del Sol. Durante muchos años se supuso que los filamentos que constituían las colas tipo I se debían al desplazamiento de los iones cometarios a lo largo de las líneas del campo magnético del viento solar; esto es, a que los iones solamente se movían en trayectorias helicoidales alrededor, y a lo largo de, dichas líneas de campo. (En esta interpretación, el grosor de los filamentos se consideraba determinado por el radio de giro de los iones alrededor de las líneas de campo magnético.) Sin embargo, de las observaciones *in situ* realizadas en la estela de Venus podemos señalar que la dirección de movimiento de los iones cometarios debe coincidir con la del viento solar y no estar necesariamente dirigida a lo largo de las líneas del campo magnético. Como en Venus, los iones contaminantes deben moverse con las partículas del viento solar e independientemente de la orientación local del campo magnético. Las observaciones obtenidas en Venus cuestionan, pues, la interpretación de los filamentos que forman las colas tipo I de los cometas como colecciones de iones desplazándose a lo largo de las líneas del campo magnético del viento solar.

De las mismas observaciones se puede inferir que esas estructuras deben ser producto de procesos de arrastre entre el viento solar y los iones cometarios y que probablemente tengan el mismo origen que las nubes ionosféricas detectadas fuera de la ionosfera nocturna de Venus. Conviene recordar aquí que las mediciones llevadas a cabo en Venus no han permitido establecer la extensión longitudinal de las nubes ionosféricas. Si éstas estuvieran conectadas en algún punto con la ionosfera del planeta, manifestarían una configuración similar a la de los rayos cometarios. El material ionizado arrojado al espacio por los cometas muestra, por otro lado, una geometría nubosa, geometría que evoluciona posteriormente a una forma parabólica, y, ésta, a su vez, se extiende longitudinalmente para dar lugar a la configuración filamentaria característica de los rayos.

Del análisis de la evolución de los rayos se ha determinado que el movimiento de las partículas cometarias contiene una componente dirigida transversalmente hacia la estela misma del cometa. Tal desplazamiento recuerda en mucho al proceso de expansión del viento solar hacia el interior de la umbra del planeta Venus y, de hecho, sugiere que la semejanza geométrica existente entre los rayos cometarios y las nubes ionosféricas en Venus se extiende al comportamiento del material que los forma. En ambos casos hay indicios de que el material tiende a desplazarse hacia el interior de la estela del obstáculo ionosférico. Como se indicó antes, ese movimiento resulta de la expansión del viento solar al calentarse viscosamente cerca del obstáculo. No debemos olvidar, sin embargo, que estas comparaciones son de carácter general y que por el momento sólo intentan presentar aspectos similares del proceso de interacción del viento solar con el material ionosférico, ya sea éste de origen planetario o cometario. Las observaciones experimentales *in situ* planeadas para la próxima visita del cometa Halley en 1986 representan, en este sentido, una gran oportunidad para someter a prueba estas ideas y para aplicar, en general, el conocimiento derivado de la exploración del planeta Venus.

Ecología de la selva tropical húmeda

La copa de sus árboles abriga una rica diversidad de comunidades vegetales y animales. Una forma nueva de aproximación permite conocer de cerca el ecosistema

Donald R. Perry

"Y queda un continente habitado por descubrir todavía. No se asienta sobre la superficie, sino treinta o sesenta metros por encima", escribía, doblando la centuria, el naturalista británico William Beebe. Referíase a la bóveda o dosel de la selva tropical húmeda, zona de copas arbóreas donde la abundancia de luz y humedad alientan, según cálculos, hasta el 40 por ciento de las especies vegetales y animales que reinan en el planeta. Transcurridos ya ochenta años, las palabras de Beebe no han perdido valor. Cuesta observar desde el suelo el dosel porque la vegetación lo tapa y obscurece todo. Y es difícil llegar hasta él porque los árboles tropicales alcanzan frecuentemente los 25 metros o más por encima del sotobosque sin ramificarse, y albergan todo un mundo de serpientes, escorpiones e insectos peligrosos.

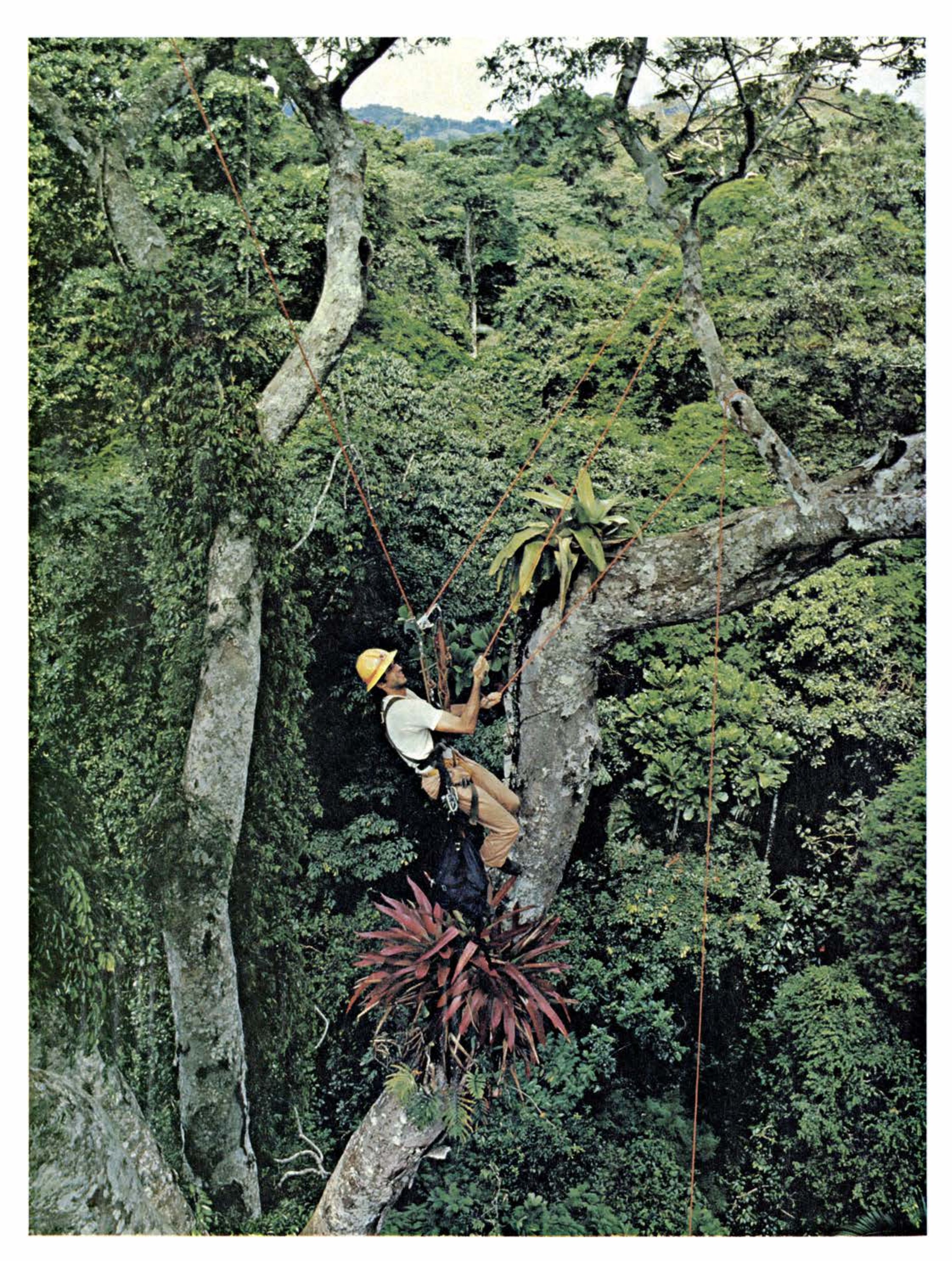
En la selva húmeda costarricense, de tierra baja, me las ingenié para salvar esos inconvenientes con un método que nos permitiera, a mis colegas y a mí, estudiar la ecología de la bóveda tropical con un detalle hasta ahora imposible. Tendimos una red de sogas a 30 metros del suelo entre tres árboles altísimos que destacaban de entre la masa vegetal circundante. Fijado con abrazaderas y sostenido por poleas, el naturalista podía elevarse por correaje y cuerdas de alpinista hasta la red, moverse por la misma y descender desde ella hasta el punto de la copa del árbol que quisiera.

No fuimos los primeros en ese esfuerzo. Citaré, a modo de ejemplo, el libro de R. W. G. Hingston *A Naturalist in the Guiana Forest*, donde se da cuenta de un intento de ésos. En 1929 realizó con colegas suyos de la Universidad de Oxford una expedición a América del Sur. Se pertrecharon de un cañón lanzacabos para instalar cuerdas de alpinista en las copas de los árboles. Pero los cabos quedaron enredados entre las lianas, formaciones leñosas que cuelgan de la bóveda de la selva húmeda. Los naturalistas contrataron entonces a indígenas para que se enfilaran árbol arriba y construyeran plataformas; pero los resultados científicos resultaron decepcionantes. Hingston sacó la conclusión siguiente: "Si esas zonas aéreas de la selva merecen ser exploradas de una manera sistemática, para lograrlo habrá que disponer de medios más perfeccionados".

En las décadas subsiguientes, los biólogos prosiguieron instalando puestos fijos de observación en los pisos altos de los árboles de la pluviselva de todo el mundo, como torres o plataformas a las que se accedía por escalas de cuerda o por cinturones y espuelas del estilo de los empleados por los funcionarios de teléfonos para reparar el tendido. Recordaré la más sobresaliente: la base construida en un árbol a 40 metros de altura por H. Elliott McClure, quien trabajaba para el Walter Reed Army Institute of Research en la selva húmeda de las cercanías de Kuala Lumpur; sucedía eso en 1960. Pero la observación de la bóveda vegetal y de las comunidades que la forman, desde atalayas fijas, constituía un ejercicio exasperante: podían quedar escondidas a la vista especies totalmente distintas en el árbol vecino, que la inmovilidad de la plataforma impedía observar.

En el verano de 1974 viajé hasta Finca la Selva, parque forestal húmedo de Costa Rica, del que es propietaria la Organización de Estudios Tropicales, de la Universidad de Costa Rica, que también cuida de su mantenimiento. Fui con la idea de probar una técnica que prometía una extraordinaria movilidad. El equipo necesario era muy sencillo y de fácil transporte. Para trepar un árbol que ofrecía buenas perspectivas, lancé una flecha con arco hacia una rama alta; era una flecha pesada, y de ella salía sedal de pescar. Até luego una cuerda de nylon trenzada con el sedal; la enrosqué en la rama. Sustituí por último la cuerda por una soga de alpinista. Escalé soga arriba ayudándome de los "jumars", abrazaderas suizas que se aferran fuertemente a la soga cuando están sometidas a tensión y se sueltan cuando quedan libres de peso; habíalas introducido en las investigaciones de las copas de los árboles William C. Denison, de la Universidad estatal de Oregon, estudioso de los bosques de zonas templadas. Sujeté unos estribos en la parte inferior del suspensor y un arnés de seguridad en la superior. Subía apoyando mi peso en los estribos mientras izaba el arnés y, alternadamente, arriaba el arnés mientras elevaba los estribos. Tardé unos 15 minutos en remontar la treintena de metros de soga que había hasta la copa, donde el correaje se convierte en un confortable asiento y cuya altura podrá variarse a voluntad según las exigencias de la observación.

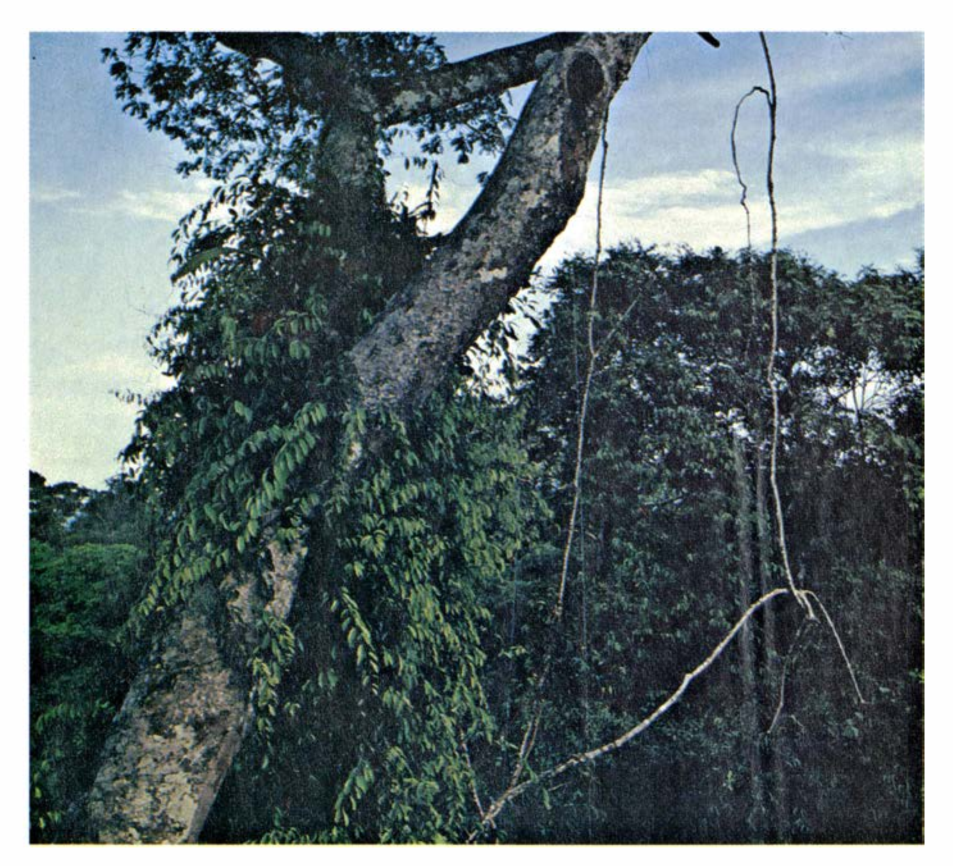
El método sólo precisa una rama fuerte de donde suspender la cuerda para no fracasar. No deja de resultar paradójico que, con la altura que los árboles tropicales tienen, sean muy pocos los que desarrollen ramas de fuerza suficiente para aguantar a un escalador. En la intensa lucha por ganar espacio en la bóveda soleada, muchas especies han sacrificado fuerza en aras de un crecimiento rápido. *Ochroma pyrimadale* es un árbol de la familia de las Bombacáceas de madera muy frágil, que constituye un ejemplo de lo que acabamos de afirmar; otros ejemplos de árboles de ramas débiles de la Finca



1. ENCARAMANDOSE HASTA LA COPA, a cuarenta metros del suelo. Por debajo quedan otros árboles del bosque tropical húmedo en Finca la Selva, Costa Rica. El sistema de sogas y poleas posibilita la exploración exhaustiva del dosel vegetal que constituye el estrato superior de la pluviselva, un ecosistema que da cobijo a múltiples especies. Se distinguen algunas en las ramas de los árboles: una liana (*izquierda*) y dos bromeliáceas (*derecha*).



2. EPIFITOS que penden de la rama de un capoc. El árbol carece estacionalmente de hojas; el verdor del mismo débese por entero a la carga de epífitos. Son éstos plantas completamente independientes del suelo, aunque no parasitan el árbol donde se apoyan; bajo ese nombre general se incluyen 65 familias de plantas vasculares, amén de musgos, líquenes y algas. Dispersadas por el viento y los animales, sus semillas y esporas germinarán en cualquier tronco o superficie ramosa del tapiz que les permita asentarse.



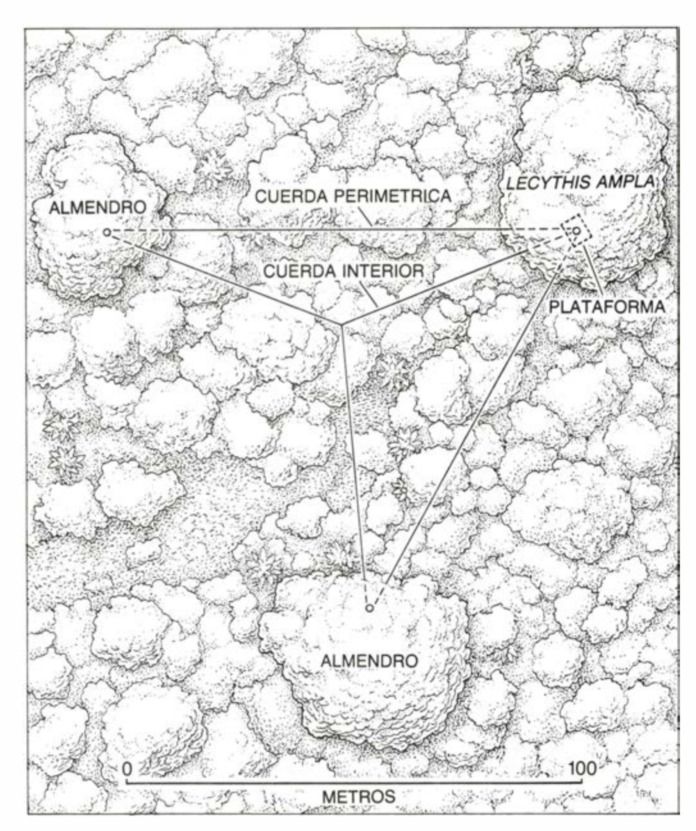
3. LIANA, *Gnetum leyboldii*, engalanando un árbol. El tallo de la liana puede llegar hasta los 23 centímetros de diámetro. El autor calculó su peso más allá de los 1270 kilogramos. En la pluviselva, donde la madera suele ser frágil y las raíces superficiales, semejante carga llega a romper o tumbar el árbol.

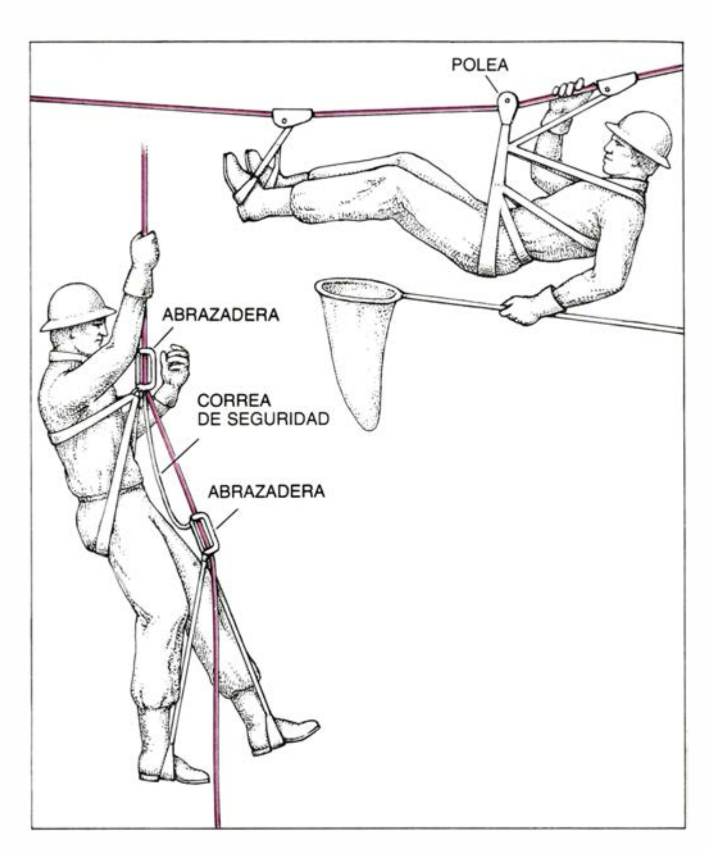
la Selva son las leguminosas, el árbol capoc (*Ceiba pentandra*), el moscadero (*Myristica fragrans*) y el dominante en esa selva, el gavilán (*Pentaclethra macroloba*). Más de la mitad de los árboles de la Finca la Selva cuya altura resulta interesante para la observación no aguantan la fuerza ejercida en mi método de escalada.

Se presentó sola una solución en 1978, momento en que andaba yo estudiando el papel de los murciélagos herbívoros en la dispersión de semillas del nogal del paraíso, *Lecythis ampla*, de la familia de las Lecitidáceas. Es ésta una especie famosa por su madera sólida y nueces comestibles. Instalé una atalaya a 34 metros en la copa de un árbol de esa especie en Finca la Selva. A una distancia de unos 100 metros, en ambos sentidos, había dos almendros (*Dipteryx panamensis*), que sobresalían de la bóveda circundante. Esta leguminosa tiene la madera de una dureza que resiste a los clavos. Parecía factible que el trío de *Lecythis* y los dos *Dipteryx* pudiera soportar con plena seguridad un tendido de correderas que permitiera el libre desplazamiento por las copas de árboles más débiles sitos en medio.

Volví en 1979 a Finca la Selva; esta vez con John Williams, ingeniero de profesión. Tendiendo un doble lazo de maroma de velero de ensayo con 3210 kilogramos, colocamos poleas en las ramas de los tres árboles de apoyo; ensartamos 350 metros de soga por las poleas y unimos los cabos para cerrar el tendido triangular continuo. Terminamos la red enjarciando una segunda soga entre la atalaya y un punto de enganche en el extremo opuesto del cercado de cuerda perimétrica (el tendido exterior). Desde la plataforma podíamos hacer correr la cuerda exterior por las poleas, deslizando la soga interior a través de la zona de selva encerrada en el triángulo hasta colocar dicha cuerda encima mismo del segmento de dosel que queríamos observar.

El investigador podía entonces deslizarse desde la atalaya por la soga interior, sujeto a una polea, engancharse a una soga descendente vertical a la red y, sirviéndose de los "jumars", introducirse por el tapiz de las copas como una oruga. Para observaciones adicionales, la soga transitoriamente vertical podría escalarse desde el suelo. La combinación de la red con las sogas descendentes facilita la total libertad de movimientos en una extensión de casi media hectárea y en una altura de 30 metros, volumen que ofrece a la observación todo un mundo natural vivo.





4. METODO PARA EXPLORAR EL TAPIZ diseñado para que el investigador tenga libertad de movimientos por las copas de los árboles. El dibujo ilustra una perspectiva desde arriba del sistema instalado en Finca la Selva, con los árboles que prestan soporte a un tendido triangular de soga que cubre una media hectárea de pluviselva. Las poleas en los puntos de agarre permiten que el cableado avance cambiando la posición de una soga interior. Por medio de una polea uncida a un correaje, el naturalista puede recorrer el cable exterior e interior hasta el punto de observación que prefiera para el estudio del dosel. La abrazadera engarzada al arnés y a los estribos colaboran en el soporte y hacen las funciones de frenos. Para descender de la red a la copa y elevarse hasta la red desde el suelo, el investigador utiliza las abrazaderas para subir y bajar en vertical por la soga, cerrando los estribos y cediendo y moviendo el correaje del arnés alternativamente, y recurriendo luego al proceso inverso. Se está preparando una versión accionada por motor.

El piso superior del bosque, objeto de nuestra investigación, abarca las dos terceras partes del volumen entero del mismo. Esa región aérea puede dividirse arbitrariamente en dos zonas: la inferior, que se extiende desde los 10 metros de altura hasta los 25, y la superior, que llega hasta los 35 metros del suelo. Sumaríamos a esas dos zonas una tercera, la emergente, donde se incluirían las copas de los árboles más altos, los que miden hasta 50 metros o más. Ambas zonas principales del dosel se encuentran bien iluminadas; no así el sotobosque, que, por culpa de la espesa vegetación que tiene encima, apenas si recibe el uno por ciento de la luz solar que llega a la copa. En el dosel todos los árboles, salvo los más chicos, exponen sus hojas, flores y frutos. Contiene muchas plantas que existen enteramente dentro de su alcance, formando comunidades vegetales que, por número de especies y complejidad de las interacciones, sobrepasan cualesquiera otros ecosistemas terrestres.

Uno de los rasgos más sobresalientes del dosel del bosque tropical húmedo es el de los epífitos. Se cifran éstos en unas 28.000 especies, integradas en 65 familias; 15.000 de ellas viven en América Central y del Sur. Son orquídeas, bromeliáceas y cactus arbóreos, amén de plantas inferiores como líquenes, musgos y helechos. Millares de epífitos más siguen sin identificarse.

La traducción griega del término epífito es la de "planta que se desarrolla sobre otra"; revisten troncos y ramas de los árboles. Los epífitos germinan de semillas traídas por el aire o depositadas por animales; sus raíces penden pegadas a los intersticios de la corteza. Pero no son parásitos. Sus huéspedes sólo ponen el apoyo favorable en la bóveda radiantemente iluminada. Para su alimentación, los epífitos dependen de las partículas del suelo y de los minerales disueltos transportados por el agua de lluvia, así como del depósito aéreo de humus. Tales depósitos son el producto de los desechos orgánicos: hojas caídas de epífitos y otros vegetales que se detienen entre sus raíces.

Sólo cuando llueve tienen los epífitos acceso directo al agua. Otras plantas gozan, además, de un contacto continuo con la humedad retenida en el suelo. Ello ha inducido a muchas especies epifíticas a desarrollar mecanismos de recogida y almacenamiento del agua de lluvia. En este sentido, orquídeas y cactus arbóreos, entre otros, poseen hojas y tallos suculentos, con tejidos esponjosos que retienen el agua, así como membranas foliares cerosas que reducen las pérdidas de humedad a través de la transpiración. Muchas orquídeas poseen unas bases bulbosas en sus tallos; otras familias de epífitos han desarrollado auténticos aljibes construidos con hojas apretadas en embudo o copas formadas en las junturas de unos pecíolos dilatados con los tallos. Ciertas especies poseen masas radiculares absorbentes, a modo de esponjas, que embeben y retienen así el agua. Las Bromeliáceas, familia de América del Sur y Central, llegan a represar decálitros de agua en las auténticas cisternas que son sus bases, que forman una suerte de piscina aérea donde acuden insectos de distintas especies, gusanos, arañas, chinches, escorpiones, ranas arbóreas y aves insectívoras.

En las condiciones favorables que presenta Finca la Selva, la densidad de desarrollo epifítico alcanza proporciones considerables. La pluviosidad anual sobrepasa los 3000 milímetros, la hu-

medad rara vez baja del 80 por ciento y la estación seca se caracteriza por su suavidad. La corteza estriada del *Lecythis ampla* que prestaba soporte a nuestra plataforma facilita el apoyo de los epífitos; sus grietas retienen, además, el agua de lluvia al alcance de la raíz de los epífitos. En un substrato de tan buenas condiciones Michael H. Grayum, de la Universidad de Massachusetts en Amherst, y el autor etiquetaron hasta 50 especies epifíticas, cuyas raíces y tallos formaban marañas de hasta 25 centímetros de espesor. Más de 50 especies quedaron sin identificar. Esos haces de epífitos, empapados de agua retenida, alcanzan pesos de varios miles de kilogramos por árbol, poniendo en tensión el débil ramaje de la pluviselva.

Cuando los nutrientes encerrados en troncos y ramaje, apenas disponibles, pues, quedan fuera de los cálculos de la biomasa forestal, los epífitos representan un elevado tanto por ciento del total. En las laderas de las pluviselvas, en los llamados bosques lluviosos, persisten unas condiciones de humedad y precipitación casi constante, fenómenos climatológicos que inducen el desarrollo de los epífitos con más fuerza que el propio entorno de Finca la Selva. En el parque de bosque lluvioso de Monteverde, en Costa Rica, Nalini Nadkarni, de la Universidad de Washington, contabilizó que los epífitos almacenaban el 40 por ciento de los nutrientes asimilados por el follaje.

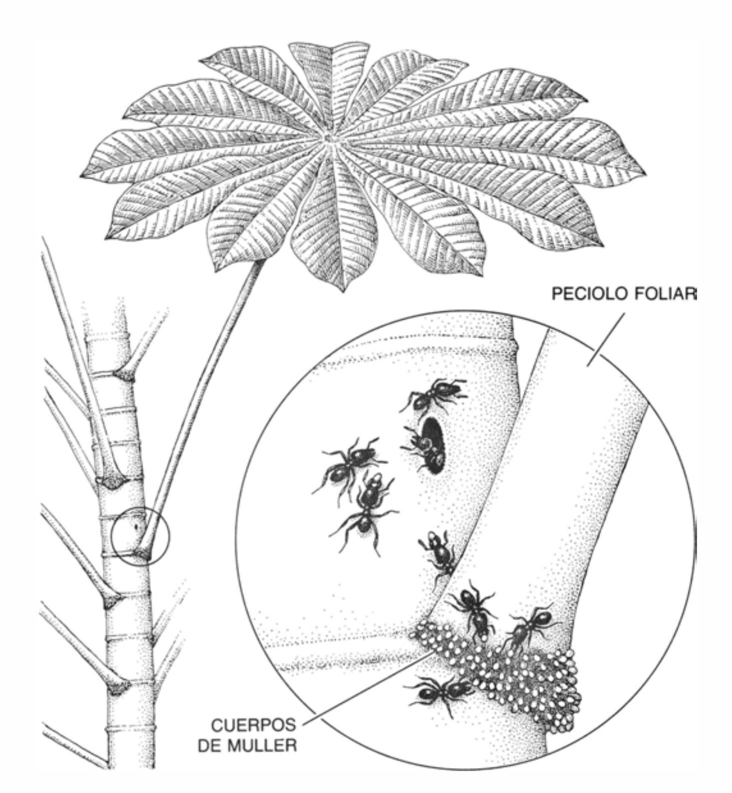
Hasta hace muy poco se venía creyendo que esos nutrientes podían reciclarse en otras plantas cuando el material epifítico, muerto el individuo, cayera al suelo. Entonces y solamente entonces. Pero se sabe ya que determinados ciclos de los nutrientes pueden desarrollarse íntegramente en la copa de los árboles. En el bosque lluvioso de Monteverde, Nadkarni siguió mi método acrobático para subir a las ramas. Y descubrió que una docena de especies arbóreas desarrollaban raíces adventicias que se prolongaban desde las ramas empinadas hasta la maraña incrustante de epífitos. Por lo que parece, las raíces absorben nutrientes del humus que se recoge en la maraña radicular de los epífitos.

Muchos epífitos abundan sobre todo en la zona inferior del dosel, donde se protegen del efecto deshidratante de la incidencia solar directa. En plena copa, donde la humedad varía bruscamente a lo largo del día, medran epífitos resistentes a la deshidratación y los hemiepífitos, otro grupo de plantas de la bóveda. Los hemiepífitos comienzan su ciclo vital como epífitos, germinando a partir de semillas depositadas en hendiduras de la corteza y en los ángulos de las ramas. Producen luego raíces epigeas capaces de descender hasta el suelo, donde absorberán la humedad necesaria y los nutrientes que les va a permitir adquirir mayor biomasa que los epífitos propiamente dichos. El peso del follaje sumado a la cascada de raíces de una sola planta se basta a veces para romper la rama que le da soporte.

Determinados hemiepífitos pertenecientes a los géneros *Clusia* y *Ficus*, en particular algunos tipos fibrosos, infligen un daño peor a su huésped: sus raíces circundan el tronco y le anastomosan, formando una suerte de caparazón en cuyo interior el tronco muere y se pudre. Para cuando llega ese momento, las raíces del inquilino han arraigado lo suficiente para convertirlo en un árbol hecho y derecho, ocupando el espacio del tapiz que antes perteneciera a su anfitrión. Según la voz popular, el estrangulador mata a su víctima ahogán-



5. ESCALONAMIENTO DE LOS AMBIENTES en la pluviselva. Entre sus efectos se cuenta el de instar la diversidad biológica. En el sotobosque, la luz es tenue, la humedad rara vez cae por debajo del 95 por ciento y la temperatura se mantiene en un valor casi inalterable. En el tapiz, en cambio, abunda la luz solar y tanto la temperatura como la humedad fluctúan. Cada nivel del bosque tiene su propia estructura vegetal y animal, incluida su propia asignación de insectos polinizadores. Las dos especies de abejas de la parte superior izquierda se hallaron sólo en la zona superior del dosel o tapiz; las dos inferiores restantes se encontraron en la zona inferior. Dicha estratificación incrementa la diversidad de las especies que habitan en las copas; al evitar el intercambio polínico, aislando así el acervo genético de los grupos y forzando el desarrollo de nuevas especies, recuerda el efecto de las barreras geográficas.





6. INTERACCION SIMBIOTICA entre hormigas y árboles para provecho de unas (género *Azteca*) y otros (género *Cecropia*). En un cojín piloso de la base de cada peciolo foliar, los árboles producen unos nódulos blancos de un milímetro de longitud que son ricos en glucógeno, forma de almidón que suele hallarse en tejidos animales. Las hormigas se alimentan de esos nódulos, conocidos por cuerpos de Müller. Las hormigas se aprovechan también de la estructura del tallo de *Cecropia*, ahuecado, que facilita su penetración y empleo como habitación cerrada para anidar. A su vez, las hormigas protegen al huésped evitándole los epífitos, al impedir que se aposenten en las ramas frágiles, que caerían por acción del peso. Cuando el autor ató musgos y otros epífitos menores a las ramas de *Cecropia*, las hormigas las limpiaron (*derecha*), desgarrando bocaditos de materia vegetal para acabar con los mismos.

dola. Pero la reciente investigación se inclina más por la victoria en la pugna que sostienen por la luz, extendiendo sus hojas con tal exuberancia que ensombrecen por entero a su anfitrión, y éste acaba por morir.

Un postrer grupo de plantas arbóreas son las bejucosas; así el filodendron, cuyos tallos contienen poco material leñoso, y las lianas. Germinan en el suelo y se encaraman hacia arriba. Al igual que hemiepífitos y marañas de epífitos, su peso abate a veces las ramas y, quizás, árboles enteros abriendo huecos en el tapiz forestal.

Esos vacíos desempeñan un papel importante en el crecimiento del bosque. Muchas especies arbóreas sólo germinan allí donde abunda la luz solar. Se salvan gracias a esas brechas ocasionales que se abren en el tapiz; al crear esas calvas, las plantas arbóreas se convierten en agentes indirectos del mantenimiento de la diversidad en la flora de la pluviselva.

Los factores ecológicos que conducían a la distribución vegetal en el dosel y las consecuencias que acarreaban esa distribución para las estrategias de reproducción constituyeron puntos centrales de mi investigación. Llama la atención que ninguna especie presente un desarrollo denso y uniforme entre las plantas que dibujan ese exuberante tapiz, confeccionado por el follaje de individuos pertenecientes a muy distintas especies y que coinciden en su vecindad. Los epífitos crecen en manchas aisladas de árboles y en la totalidad de la selva considerada como una unidad.

Se sabe de muchos factores que inciden en la distribución de los epífitos. Las ramas más robustas y antiguas suelen cargar con la mayor masa epifítica ante las mejores oportunidades que ofrecen a la colonización. Un árbol protegido con una corteza recortada o estriada presenta indudables ventajas a la hora de agarrarse las raíces trepadoras y zarcillos de los epífitos. Los distintos epífitos tienden a agruparse en torno a las ramas umbrías o soleadas según su específica adaptación. Suelen mostrar asimismo preferencia por las ramas que caen por las rutas que, a través de las copas de los árboles, siguen aves, murciélagos, monos, ardillas y otros mamíferos que transportan semillas de epífitos en sus plumas y pelos, mandíbulas y picos o las excretan. Por igual razón, los epífitos suelen medrar en aquellos árboles que dan excelentes frutos y reciben por ende la asidua visita de los animales que los comen. No suelen verse epífitos en el camino mismo que siguen los mamíferos arborícolas, por tronco y ramas. Esas aerovías son de vegetación rala, a imagen de lo que vemos en las veredas de ganado.

Debido a que la maraña epifítica puede constituir una amenaza directa contra la pervivencia del árbol frágil, muchas especies han desarrollado defensas activas contra la colonización de esas trepadoras. Así puede interpretarse la renovación frecuente de la corteza vieja, con cuyo desprendimiento se liberan también de los jóvenes epífitos agarrados. Algunos autores atienden a los alcaloides presentes en la corteza de muchos árboles del bosque húmedo, que supondrían otra arma contra el ataque de epífitos y bejucos. Los alcaloides actuarían, en ese supuesto, de sustancias químicas alelopáticas, sintetizadas por la planta y que inhiben el desarrollo de otros vegetales.

Allí donde las condiciones les son propicias, los epífitos crecen a una velocidad vertiginosa. Cuantas veces he vuelto a mi lugar de trabajo en Finca la Selva me he encontrado con que las sogas y atalayas abandonadas escasos meses antes se encontraban colonizadas por una capa de jóvenes epífitos, como percebes revistiendo el casco de una embarcación. Hay, sin embargo, árboles que ni mudan la corteza ni contienen sustancias químicas alelopáticas y, no obstante, tampoco conocen la in-

vasión de los epífitos. ¿Dónde reside el secreto de su inmunidad?

Mi investigación abona la idea, expuesta ya por Daniel H. Janzen, de la Universidad de Pennsylvania, según la cual habría que buscar la razón en las relaciones mutualistas entre los árboles en cuestión y determinadas especies de insectos de la copa. Según Janzen, artrópodos del género *Azteca* hallados en especies arbóreas del género *Cecropia* limpiaban de epífitos en fase de germinación las ramas; así protegían el árbol entero de la sobrecarga que supondría para sus ramas, de singular fragilidad, la invasión de aquellos inquilinos. Las hormigas del género *Azteca* tendrían, diríase, un interés especial en mantener su propio hogar arbóreo. *Cecropia* ofrece especiales beneficios a esos insectos. En la base del peciolo foliar, los árboles producen nódulos ricos en almidón de los que se alimentan las hormigas. Los tallos del árbol, ahuecados cual cañas de bambú, las protegen en su anidamiento y cuidado de los áfidos.

No ha sido fácil confirmar la hipótesis. El comportamiento agresivo de *Azteca* ha impedido observar su forma de conducirse. Gracias a la red de cuerdas de Finca la Selva llegamos a la estrecha observación de las ramas de *Cecropia* mientras estaban libres todavía del enjambre de hormigas. Sirviéndome de un fino sedal, até a varias ramas epífitos de distinto tamaño. Como movidas por un resorte, treparon por la maraña camuflada y comenzaron a arrancar bocaditos sueltos de verde. Tiraban de los trozos y los arrojaban fuera de las ramas. El cabo que contenía los epífitos más pequeños –musgos y plantones de escasos milímetros de altura– quedó limpio en cuestión de días; por contra, los epífitos de tamaño mayor permanecieron inalterados. De lo que se deducía que las hormigas protegían a *Cecropia* de la carga epifítica, si bien cumplían esa misión de una manera profiláctica, mientras los invasores eran pequeños.

También se ven libres de epífitos otras especies de árboles de la pluviselva que albergan hormigas. Lo que nos permite concluir que esos insectos desempeñan, a buen seguro, un papel muy destacado en la distribución de los epífitos en ese ecosistema de bosque.

Vayamos con otro aspecto de la distribución de la vida en el dosel vegetal: el amplio espaciado entre árboles que pertenecen a una misma especie. Se venía atribuyendo a dos factores. Primero, el número absoluto de especies que coexisten en la selva. Alberga ésta una amplísima acumulación de formas orgánicas que refleja los más de 65 millones de años que lleva de existencia como ecosistema inalterado, aunque fecundo en la producción de nuevas variedades. Más de 200 especies de árboles se han descubierto en una extensión superficial de sólo dos hectáreas en el bosque llano de la península malaya. El segundo factor que se ha supuesto responsable de tamaña dispersión es la presión de los herbívoros. Los insectos, aves y mamíferos prestos a devorar semillas y plantones se arremolinan en torno al árbol parental: cuanto más alejada del progenitor hunde sus raíces una semilla mayor es su probabilidad de sobrevivir. Ventajosa para los plantones, la distancia dificulta, por contra, la polinización cruzada de los árboles adultos. La copa es el lugar de floración y polinización de las principales especies. La observación directa nos ha permitido descubrir la forma en que los árboles vencen las dificultades que encuentran en su función reproductora.

Ante el hecho de la lejanía de un individuo de otro de la misma especie y, de acuerdo con las primeras observaciones, que revelaban la escasez de animales que pudieran polinizar plantas muy alejadas, muchos naturalistas supusieron que los árboles tropicales serían, en su mayoría, autopolinizadores, capaces de producir semillas con su propio polen. Pero ocurre que son muchas las especies tropicales dioicas: los órganos sexuales están en flores distintas y en distintos pies, lo que desmiente la presunta autopolinización. Más aún, por recientes observaciones en los pisos altos de los árboles sabemos que abundan especies animales que buscan su alimento en un radio amplio: mariposas, polillas, aves, murciélagos, abejas y otros insectos, que transportan polen entre los individuos dispersos de una misma especie. La presencia de una comunidad entera de polinizadores parece obviar la necesidad de selección en favor de la autopolinización.

Muchos polinizadores que habitan en las copas no se les vio nunca por la cubierta del suelo. Mariposas y abejas del bosque lluvioso, así como sus aves, reptiles y mamíferos mantienen una estratificación zonal entre comunidades del dosel y del piso inmediato inferior. Los polinizadores de la punta, del piso superior, raramente bajan el escalón inferior inmediato de la copa, lo que explica por qué no se les detectó en el pasado; fenómeno que comporta, a su vez, una destacada influencia evolutiva. La existencia de comunidades polinizadoras estancas indica que apenas si se da intercambio polínico entre distintos ni-



7. RANA ARBOREA DE HUESOS VERDES asida a una orquídea. La planta es un epífito de 34 metros de altura. Las reservas permanentes de agua de lluvia almacenada en algunos epífitos les permite a las ranas arbóreas incubar, pasar sus estadios larvarios y poner sus huevos sin tener que bajar de la copa.

veles de la selva. El efecto de ello en la herencia nos recuerda el ejercido por las barreras geográficas; al igual que una cadena montañosa o un estrecho, también la estratificación de los polinizadores puede alentar la especiación. Una misma especie arbórea que posea individuos que llegan al tapiz general y otros que se quedan un grado debajo del dosel se dividirá a la larga en dos nuevas variedades en virtud del aislamiento genético en que van quedando ambos grupos. A la estratificación de los polinizadores deberíamos, pues, parte importante de la diversidad reinante en la selva tropical húmeda.

Los naturalistas que han investigado las estrategias reproductoras de la flora de nuestro ecosistema confirman la hipótesis de que la polinización cruzada constituye la regla entre los árboles. (Los epífitos, que apenas si reciben la visita de insectos polinizadores, se caracterizarían por la autopolinización.) Kamaljit S. Bawa, de la Universidad de Massachusetts en Boston, descubrió que el 79 por ciento de los árboles del bosque seco costarricense dependía de la polinización cruzada para la producción de semillas. Bawa, James H. Beach, de la Universidad de Massachusetts en Amherst, y el autor ampliaron el estudio a la selva húmeda de Finca la Selva; llegamos a idéntico resultado.



8. CIEMPIES paseándose por la rama de un árbol a 33 metros de altura. El ejemplar mide 15 centímetros de largo y puede infligir dolorosas picaduras con sus dos mandíbulas venenosas. La presencia de animales tan dañinos en troncos y ramas desanimó los primeros intentos por explorar el tapiz vegetal.

En el intercambio de polen entre puntos alejados los árboles se ven ayudados por el vuelo en busca de alimento de las abejas de la copa. En ese comportamiento Janzen distinguió un estilo, al que llamó "correo"; suele darse en la parte inferior de la copa. Algunas especies de aves retienen en la memoria una ruta, de varios kilómetros de longitud a veces, que las conduce hasta múltiples flores que producen grandes cantidades de polen. Estrategia que les permite sacar partido de los árboles que producen pocas flores, pero de elevado rendimiento. En el gran número de árboles que cruzan en su camino se incluyen algunos pertenecientes a la especie en cuestión, lo que determinará que la abeja se convierta en una suerte de correo de polen. Ese comportamiento contrasta con la libación oportunista por la que las abejas corren hacia árboles muy floridos; y gastan la mayor parte de su jornada libadora en las ramas de un mismo árbol.

En Finca la Selva, me encontré con otro estilo de búsqueda y recogida de alimento que también podría ayudar a la polinización cruzada: la libación en grupo. Hasta 11 especies de abejas, si no más, volaban rutinariamente de árbol en árbol agrupadas en formaciones de decenas o centenas. El carácter mixto de los grupos aumentaría el rendimiento de su actividad: una especie podría aportar su habilidad en la localización de flores, otra su manejo sobresaliente de los mecanismos florales que exponen el polen, una tercera destacaría sus expertos cosechadores. La heterogeneidad incita también, por lo que se ve, al movimiento frecuente y al consiguiente acarreo de polen.

Los propios árboles pueden haber desarrollado sus estrategias para fomentar el movimiento de los polinizadores y promover la polinización cruzada. Andrew Starrett, de la Universidad estatal de California en Northridge, y el autor hallaron que los almendros (especie que prestaba soporte a la red, según vimos) exhibían estrategias de polinización cruzada. A diferencia de muchos otros árboles tropicales en que los individuos suelen florecer a la vez, los almendros lo hacen manteniendo cierto suave desfase. El período de floración abarca unos dos o tres meses, a lo largo del cual cada árbol está varias semanas en flor. Por mor de esa asincronía, las abejas se ven obligadas a cambiar el árbol de libación, lo que insta la transferencia polínica.

Esas estrategias de floración pudieran repetirse con frecuencia entre los árboles que tienen un lugar en el tapiz. Gordon W. Frankie y William A. Haber, de la Universidad de California en Berkeley, sostienen que hasta las mismas especies que coinciden en la floración no lo hacen del todo para alentar el movimiento de los polinizadores. Hasta hoy nadie se ha arriesgado a explicar el mecanismo regulador de esa asincronía. Nada cuesta imaginar que los árboles, en respuesta a claves del medio, florezcan simultáneamente o que cualquier desconexión entre los individuos provoque un patrón de floración aleatorio. Lo difícil es entender cómo una especie consigue el grado justo de asincronía para instar la polinización cruzada.

En la selva tropical húmeda predominan, de lejos, las angiospermas, plantas con flores y semillas encerradas en el ovario de la progenitora, que, en muchas especies, madura en un fruto carnoso. Las gimnospermas, que en la forma de coníferas dominan entre los árboles de bosques templados y árticos, escasean en la pluviselva. Hasta el Cretácico superior, hace unos 65 millones de años, las gimnospermas se enseñorearon de los Trópicos: cícadas, ginkgos y coníferas. Charles Darwin calificó el súbito eclipse de las mismas por las

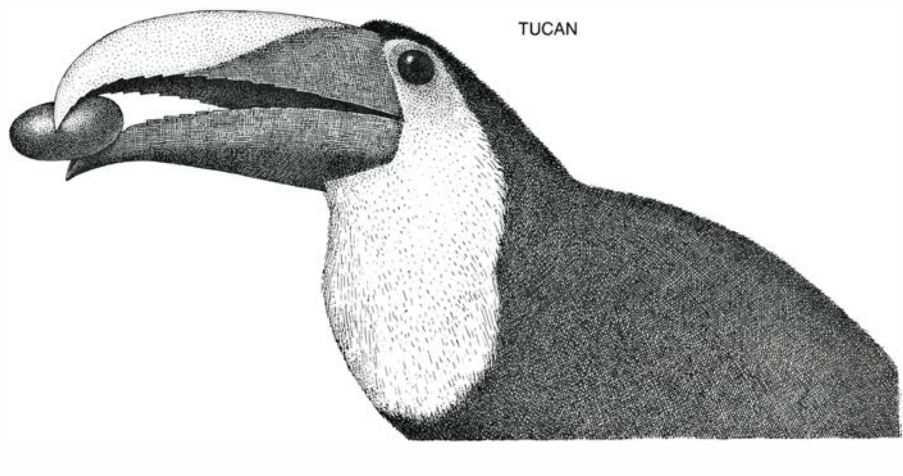
angiospermas como un "misterio abominable". ¿Qué razón hubo para el declive de las gimnospermas en los bosques tropicales? Quizá lo que hemos observado en la copa pueda darnos la respuesta.

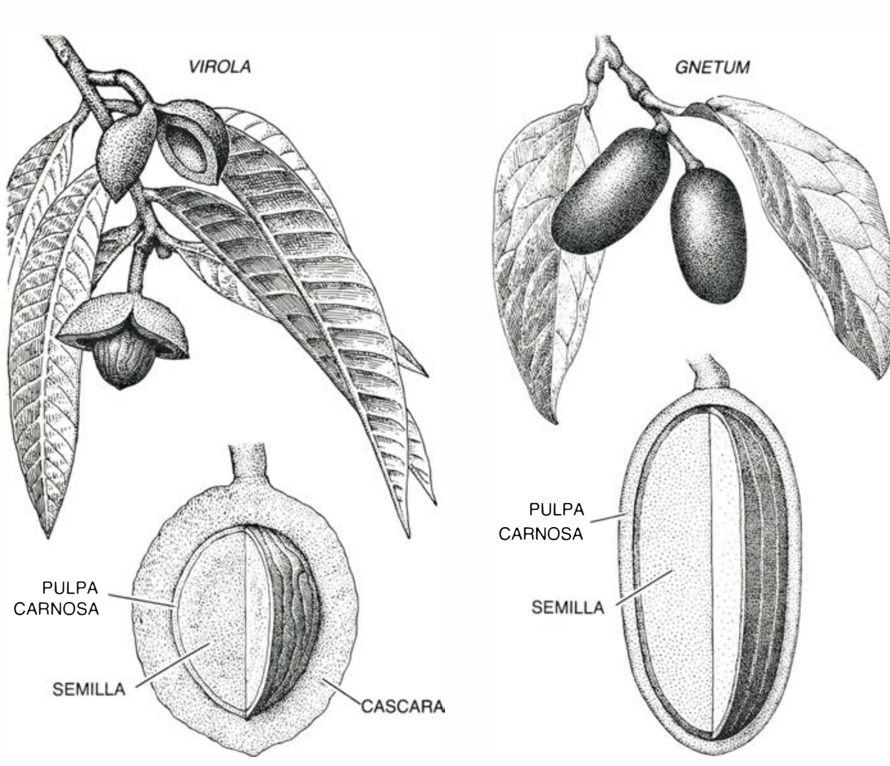
En nuestros distintos bosques de angiospermas, con su amplio margen de un individuo a otro de la misma especie, el que las gimnospermas quedaran al albur del aire para la transferencia polínica las colocaría en franca desventaja. Ese método sólo tiene eficacia en bosques más homogéneos, donde los intervalos de un individuo a otro de la misma especie son pequeños. A Philip J. Regal, de la Universidad de Minnesota, no le parece razón suficiente para explicar el declive de las gimnospermas su método inseguro de polinización. Antes de que la polinización eólica se convirtiera en una rémora, las angiospermas tendrían que haberse multiplicado en número suficiente para aislar las gimnospermas. Hay que buscar otros factores para justificar la eclosión de las angiospermas, presume Regal.

Y sugiere este autor que el desarrollo crucial fue la evolución de las aves comedoras de frutos, que acarreaban semillas hasta puntos muy distantes, episodio que sucedió en el Cretácico superior. La llegada de las aves hizo posible que los frutos donde se encerraban las semillas de las angiospermas exhibieran su plena capacidad evolutiva. En la selva tropical, la capacidad de un árbol para dispersar sus semillas constituye una ventaja selectiva; por doble razón: escapa a la labor depredadora de los herbívoros que rondan la planta progenitora para destruir semillas y plantones; segunda, permite que la especie disperse sus semillas por los vacíos iluminados que se han abierto en el tapiz. En el caso de las gimnospermas, cuyas semillas caen todas junto al árbol progenitor, la posibilidad de que una de ellas alcance el entorno favorable de un hueco abierto en la selva es mucho menor que en el caso de las angiospermas, cuyas semillas caen por una zona extensa del bosque.

Resulta, pues, racional imaginar que la combinación de flor y fruto impulsara a las angiospermas a ganarle espacio a las gimnospermas en un bosque dominado por éstas. La dispersión de semillas hasta puntos distantes por excreción o regurgitación del tubo digestivo de las aves, del que salen intactas, originó una población de individuos aislados. La flor aseguraba su éxito reproductor al seducir la atención de libadoras, que así acarreaban el polen hasta otros individuos colonizadores. La superioridad mostrada por las angiospermas a la hora de evitar que los depredadores acabaran con sus semillas y colonizar los huecos abiertos en el tapiz facilitó la multiplicación de las mismas. El sistema de polinización eólica de las gimnospermas pronto se tornó inviable, sellándose así su expulsión del juego evolutivo.

Las contadas gimnospermas que permanecen en la pluviselva llana de Costa Rica corroboran la teoría de Regal. Parecen haber resistido hasta nuestros días gracias a haber imitado las maneras de las angiospermas para sacar provecho del mismo sinergismo de dispersión de semillas hasta puntos alejados y polinización mediada por especies animales. *Gnetum leyboldii*, liana que pende del dosel de Finca la Selva, es una especie de gimnosperma. Muchas gimnospermas, haciendo honor al significado griego del término, producen semillas desnudas. Me entretuve observando, desde la copa de una leguminosa de 52 metros de alto, las semillas de *Gnetum*: desempeñan la función, permítaseme decirlo, de un fruto ecológico. Las semillas están encerradas en una capa carnosa de dos milímetros de espesor que contiene un jugo dulce. Vi





9. MIMESIS, pautas de evolución imitadora sugeridas por la comparación entre la liana *Gnetum leyboldii*, una especie de gimnosperma, y una angiosperma del género *Virola*. Al igual que el fruto de *Virola*, y a diferencia de la mayoría de las semillas de gimnospermas, las de *Gnetum* se recubren de una capa carnosa, jugosa y dulce. Este pseudofruto atrae la atención de un ave comedora de frutos: el tucán, que se alimenta también del fruto de *Virola*. En ambos casos, el pájaro separa la carne en su buche muscular y regurgita la semilla; en ese proceso transporta el corazón de la misma lejos del lugar donde vive la planta progenitora. La dispersión de las semillas favorece el éxito reproductor de los árboles tropicales. Las hojas de *Gnetum* despliegan un modelo de venación o nervadura intersecante, carácter este también que es frecuente en las plantas con flores y raro en las gimnospermas. Quizá *Gnetum* sobrevivió al declive de las gimnospermas en el bosque tropical merced a su imitación de los rasgos de las angiospermas.

cómo una especie local de tucán, del género *Ramphastos*, se alimentaba de semillas de *Gnetum* como si se tratara de un fruto de angiosperma: devorando la pulpa entera y regurgitando el corazón, con frecuencia lejos de la planta progenitora. Puesto que *Gnetum* pervive como especie de individuos muy dispersos, con sexos separados en pies distintos, resulta palmario que imita a las angiospermas en un segundo rasgo crucial: comprometiéndose con los insectos para que éstos transporten su polen. (No sabemos dónde le encuentran los polinizadores a la liana la gracia, ya que no produce nada que se parezca a flor o a néctar.) Según David y Debbie Clark, de la Organización de Estudios Tropicales, la otra gimnosperma que persiste en Finca la Selva es una cicadácea del género *Zamia*, cuyas semillas dispersan también los animales, según parece.

Resulta cruel ironía que ahora que comenzamos a conocer la ecología de la selva tropical húmeda –y en particular del dosel que la tapiza–, el ecosistema vaya desapareciendo. En un libro titulado *Conversion of Tropical Moist Forests*, publicado hace cinco años por National Academy Press, los especialistas daban la voz de alarma: para finales de la década quedará muy poco de los bosques húmedos de América Central. La situación global es sólo ligeramente menos catastrófica. Cada año se pierden, "se limpian", 210.000 kilómetros cuadrados de bosque primario. La previsión realizada en 1973 por Paul W. Richards, en la edición americana de esta revista, se ha demostrado correcta: para el año 2000 habrá desaparecido la mayor parte de la selva tropical húmeda. Puesto que la deforestación parece responder al imperativo de satisfacer las necesidades del Tercer Mundo a través de más tierra cultivable, nuevos pastos y madera de combustible, no parece que la tendencia vaya a invertir su sentido.

Con la pérdida de la pluviselva, el planeta se quedará sin muchas de sus especies y su acervo de diversidad genética. El National Research Council de los Estados Unidos prevé que la mitad de las especies vegetales y animales que coexisten hoy se extinguirán antes del 2100. El conocimiento adquirido desde el ecosistema de las copas nos permite afirmar que la diversidad perdida será mayor. La mayor ola de extinción desde el Cretácico, instada por la necesidad del hombre, parece aproximarse. Arrasará no sólo formas orgánicas de singular belleza y encanto, sino también muchas especies todavía por conocer que quién sabe si no encierran secretos para la agricultura y la medicina.

Tal vez haya en juego importantes descubrimientos del pasado de nuestro planeta y de nuestra propia especie. Se empieza a ver que el dosel de los bosques tropicales pudo desencadenar varios acontecimientos evolutivos de singular alcance. Incluir, por ejemplo, el desarrollo del vuelo en los precursores de las aves y, en nuestros antepasados primates que allí vivían, la aparición de la visión estereoscópica y un alto grado de inteligencia y coordinación física, rasgos de especial valor para desenvolverse en el complejo entorno de los pisos altos de los árboles. La visión estereoscópica podría haber fomentado la evolución de la sociabilidad: a medida que los ojos se mueven juntos, el campo de visión se acorta y con él la capacidad de un animal solitario para detectar la presencia del depredador. La posibilidad de examinar esos ambientes que trajeron esas innovaciones biológicas se está desvaneciendo.

Para forzar el ritmo de estudio de un bosque menguante y reconocer algunos, por lo menos, de sus potenciales beneficios para la humanidad se precisan medios más adecuados para explorar el dosel vegetal. John Williams y el autor están desarrollando un sistema denominado Red Automática para esplorar el Dosel (AWCE, de su lectura inglesa: Automated Web for Canopy Exploration), que habrá de permitir el acceso sin trabas a una extensión de ocho hectáreas, desde el nivel del suelo hasta el ápice de la copa de los árboles más altos. Tres ejemplares robustos prestarán soporte a un lazo triangular de un cable de acero, atravesado por otro cable (análogo a la soga interior de la red original). El investigador se desplazará en una telesilla, cuya posición estará en sus manos actuando cabrestantes eléctricos de control remoto. Montados en una cabina de control sita tras uno de los árboles de sostén, los cabrestantes harán que el cable exterior o perimétrico gire y deslice la telesilla por la soga interior. Generadores diesel aportarán la energía necesaria para el tendido y sus componentes. Se ha buscado ya un lugar provisional para el AWCE; se ensayará en un pequeño valle cerca del Parque Nacional Braulio Carrillo, de Costa Rica.

El estudio de los bosques tropicales húmedos es asunto de extrema urgencia. Hemos de reconocer las subvenciones de la compañía Rolex y las becas del Instituto de Estudios Contemporáneos, pero se necesitan muchísimas más ayudas.

El láser C^3

La asociación de dos láseres de semiconductor proporciona un haz de gran pureza que permite producir sistemas de comunicación capaces de transmitir señales con velocidades del orden de los mil millones de bits por segundo

W. T. Tsang

Cuando los indios americanos transmitían mensajes por medio de señales de humo estaban haciendo uso de los mismos principios en los que se basa la comunicación óptica moderna. Las nubes de humo intermitentes que los indios producían en lo alto de una montaña eran señales digitales. En realidad, esas señales eran binarias: codificaban la información en los términos de presencia de nubes de humo o ausencia de nubes de humo. El portador de la información era la luz, el medio de transmisión era el aire y el fotodetector era el ojo humano. La duplicación de la señal en una segunda cumbre para su transmisión a una tercera hacía el papel de una reamplificación de la señal.

En la actualidad las señales digitales se producen con un láser de semiconductor; los medios de transmisión son las fibras ópticas. De hecho, la disponibilidad simultánea de láseres de semiconductor fiables y fibras ópticas de baja pérdida hará posible la obtención de sistemas de comunicación capaces de soportar los aumentos en el tráfico de información que se prevén para finales de este siglo. La superioridad de un sistema óptico sobre un sistema eléctrico se mide mediante criterios basados en la capacidad de transportar información (cuatro órdenes de magnitud mayor en los sistemas ópticos), la pérdida de energía en la transmisión de señales (dos órdenes de magnitud menor) y la posibilidad de error (un orden de magnitud menor). En los Estados Unidos, la American Telephone and Telegraph Company poseía un circuito de unos 30 millones de kilómetros de líneas de comunicación ya en operación o en fase de instalación a finales del pasado año. Existe el proyecto de que una fibra óptica submarina entre en servicio entre Norteamérica y Europa a principios de 1988.

Sin embargo, en la actualidad no se dispone de un láser de semiconductor que sea adecuado para la comunicación óptica. En consecuencia, los láseres utilizados en estos sistemas no pueden utilizar plenamente la capacidad de transporte de las fibras ópticas. Los láseres de semiconductor que existen –contrariamente a lo que la gente cree– no emiten luz con una longitud de onda única. Por el contrario, dichos láseres emiten toda una familia de longitudes de onda diferentes, y éstas se propagan a través de las fibras ópticas con distinta velocidad. El resultado puede ser una señal borrosa.

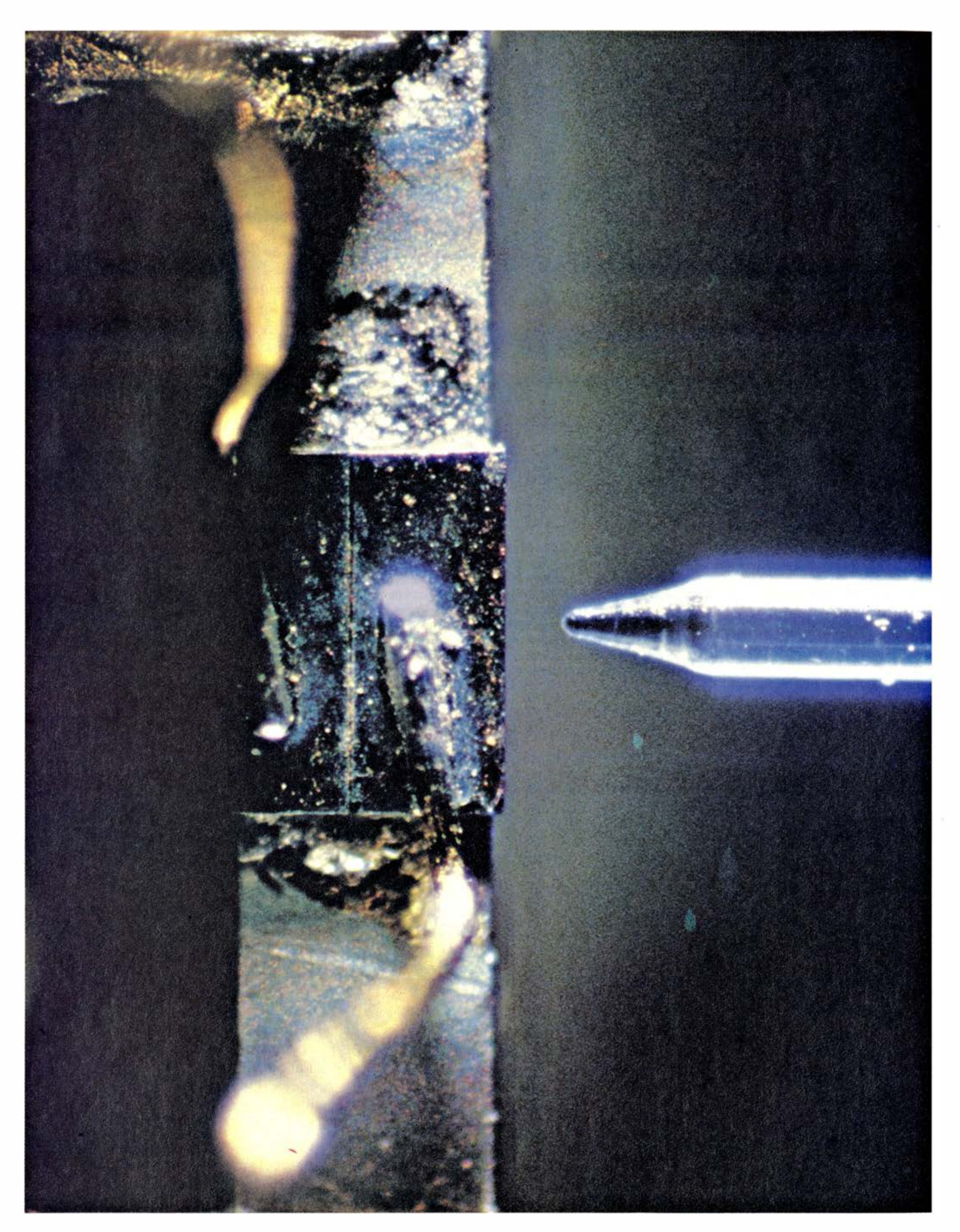
En este artículo describiré un nuevo tipo de láser que mis colegas y yo hemos desarrollado en los laboratorios Bell, de la ATT. Lo denominaremos láser de cavidades separadas y acopladas o láser C^3 (por las tres iniciales de *cleaved-coupled-cavity*, que lo definen). En esencia, este dispositivo consiste en la asociación de dos láseres de semiconductor ordinarios, capaces de interaccionar ópticamente e independientes eléctricamente. Gracias a esta asociación, el láser purifica su propia salida, de forma tal que el haz emergente es una radiación electromagnética monocromática. Por otra parte, la salida de este láser se puede hacer variar con gran rapidez de una longitud de onda a otra. El láser C^3 permite augurar mejoras sustanciales en la capacidad de los sistemas de comunicación óptica para transportar información. La posibilidad de sintonización de estos láseres abrirá el camino a nuevas aplicaciones, más allá de la comunicación óptica. Por ejemplo, estos láseres se pueden utilizar como elementos lógicos óptico-electrónicos, capaces de procesar información a una velocidad del orden de gigabits por segundo (10^9 operaciones por segundo).

Dado que las dos tecnologías en que se basa la comunicación óptica –el láser como productor de la señal y la fibra óptica como medio para la transmisión de aquélla– están íntimamente relacionadas entre sí, una explicación de la utilidad de los C^3 debe empezar con la fibra, no con el láser.

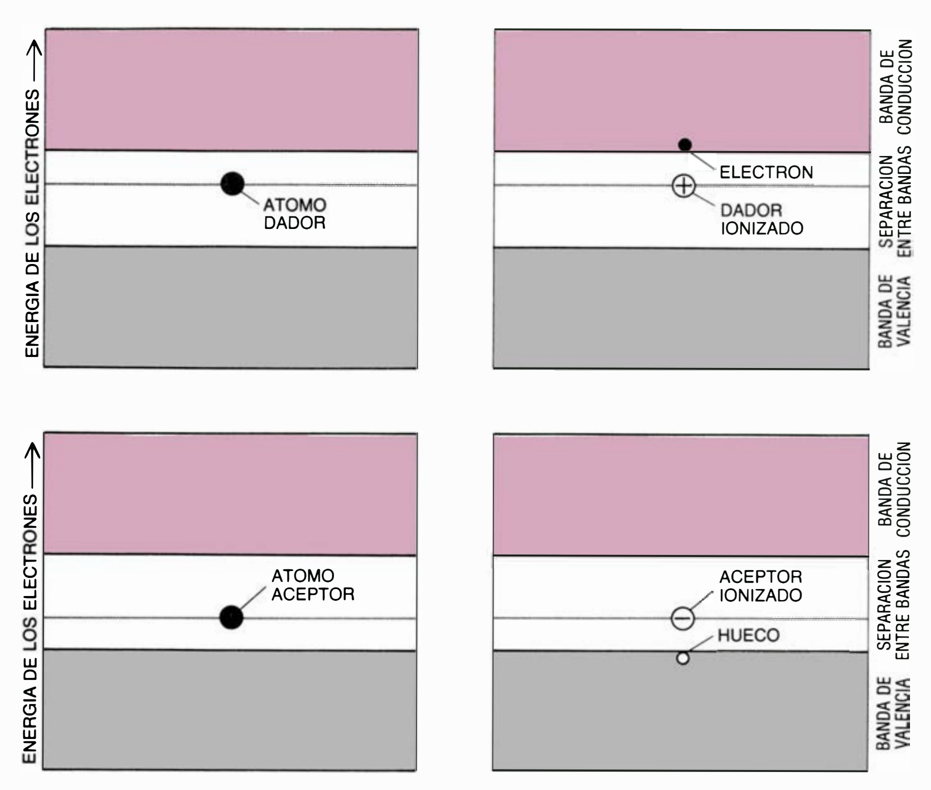
Una fibra óptica transmite la luz por su interior debido a que la luz no puede escapar de ella. Y la luz no puede escapar debido a que el índice de refracción del núcleo de la fibra es mayor que el índice de refracción del recubrimiento que rodea a dicho núcleo. (El índice de refracción es simplemente la relación entre la velocidad de la luz en el vacío y su velocidad en el material considerado.) Debido a la existencia de un gradiente en el índice de refracción entre el núcleo y el recubrimiento, la luz resulta atrapada y sigue una trayectoria en zigzag a lo largo de toda la fibra.

El número de trayectorias posibles (o modos de propagación) en una fibra dada viene determinado por el diámetro del núcleo, por el gradiente del índice de refracción entre el núcleo y el recubrimiento y por la longitud de onda de la luz. Cuando el diámetro o el gradiente son grandes, se dispone de muchas trayectorias posibles; estas fibras se conocen como multimodales. Cuando el diámetro o el gradiente disminuyen, se reducen los modos de propagación. En última instancia, la propagación tiene lugar según un modo axial único.

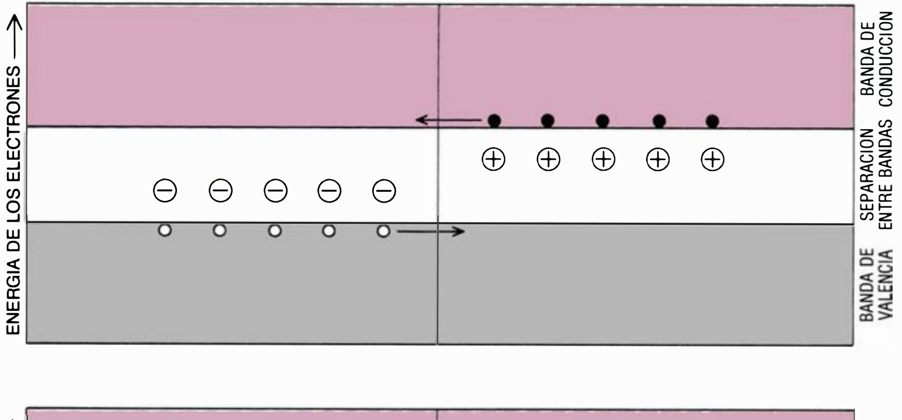
En una fibra multimodal un pulso de luz monocromática contiene todos los modos; en otras palabras, todas las trayectorias en zigzag son posibles. Cada trayectoria alcanza una longitud diferente y, por tanto, a cada modo corresponde un tiempo de transmisión diferente. Como consecuencia de este hecho, el pulso se ensancha temporalmente. Dado que la información está codificada en forma de una sucesión de pulsos, ese ensanchamiento limita la velocidad a la que se puede transmitir la información (expresada en bits, o dígitos binarios, por segundo) y condiciona también el espaciado de los oportunos repetidores (reamplificadores de la señal). Este problema se puede evitar utilizando una fibra de modo único.

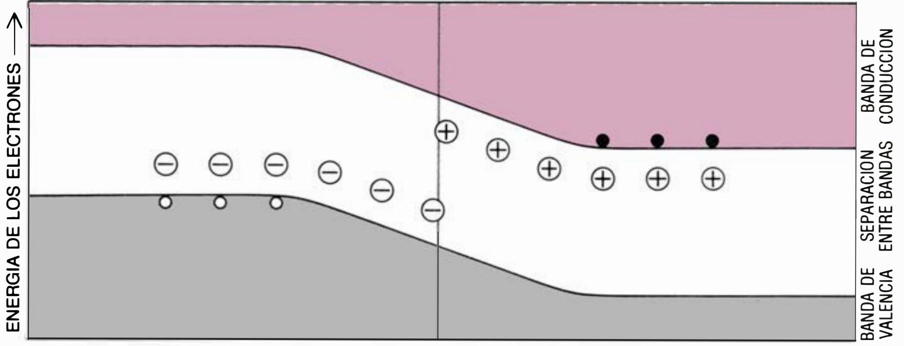


1. LASER DE CAVIDADES SEPARADAS Y ACOPLADAS desarrollado por el autor y sus colaboradores en los laboratorios Bell de la ATT. Esta figura reproduce una fotografía de dicho dispositivo visto al microscopio. A la derecha se puede apreciar una fibra óptica de unos 100 micrometros de diámetro. Su extremo tiene forma de lente con el fin de capturar la luz procedente del láser. El extremo de la fibra está dirigido hacia el láser (el objeto rectangular de la izquierda). La línea vertical delgada que se aprecia en la superficie del láser es la separación entra las dos mitades que lo forman; el láser de cavidades separadas y acopladas, conocido también como láser C^3 (por "cleaved-coupled-cavity"), consiste en dos láseres con un espacio entre ellos. El C^3 emite luz con una longitud de onda no visible de 1,55 micrometros. Las fibras de vidrio de sílice son transparentes a la luz de esta longitud.



2. UN SEMICONDUCTOR es un material en el que una pequeña cantidad de energía es capaz de promover a los electrones de la banda de valencia (*gris*), en la que dichos electrones están ligados a los átomos, hasta la banda de conducción (*color*), en la que los electrones se mueven libremente. Introduciendo impurezas en un semiconductor intrínseco, en el silicio por ejemplo, se pueden preparar dos tipos de semiconductores diferentes. En el semiconductor de tipo *n* (*parte superior*) los átomos de impurezas conocidos como dadores aportan un electrón a la banda de conducción. A su vez, estos átomos dadores se convierten en iones positivos. En el semiconductor de tipo *p* (*parte inferior*) los átomos de impurezas conocidos como aceptores capturan un electrón de la banda de valencia y forman un "agujero" o "hueco". Esta ausencia de electrón es en realidad una carga positiva. Los átomos aceptores se convierten en iones negativos.



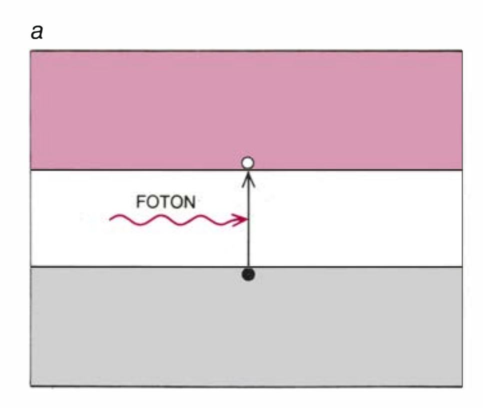


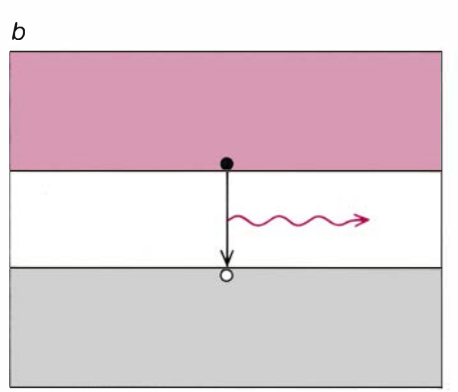
3. UNION P-N, consistente en la transición de un material semiconductor de tipo *p* a tipo *n* en una zona limitada. En el mismo instante en que la unión se forma (*parte superior*) el lado *n* tiene un exceso de electrones y el lado *p* un exceso de agujeros. Cuando un electrón se encuentra con un hueco (en un semiconductor ideal), se recombinan, se producen algunos átomos de impurezas ionizados (*parte inferior*) y se origina un campo eléctrico en los alrededores de la unión. La existencia de este campo eléctrico determina que la unión *p-n* sea el elemento más importante de la electrónica de semiconductores.

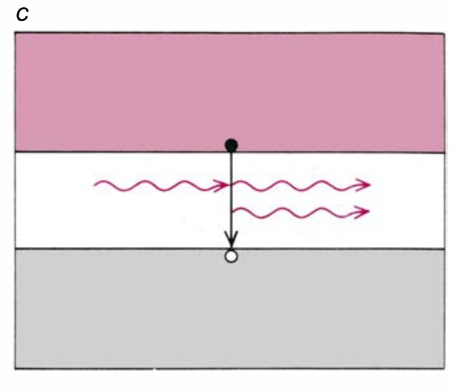
Supongamos ahora que un pulso luminoso incluye toda una serie de longitudes de onda. La luz de diferentes longitudes de onda se propaga con velocidades diferentes en un material dado. El pulso de luz se ensancha, pues, aun cuando se utilice una fibra de modo único. Este fenómeno se conoce con el nombre de dispersión cromática. Sorprendentemente, la imagen de dispersión se invierte de forma espontánea (en las fibras empleadas hoy en día, basadas en el silicio) para una longitud de onda del orden de 1,33 micrometros; esta longitud de onda se sitúa en la región del infrarrojo del espectro electromagnético. Todas las longitudes de onda próximas a 1,33 micrometros se mueven con la misma velocidad. Para longitudes de onda menores que 1,33 micrometros la parte relativamente "azul" de la luz se mueve más despacio que la parte relativamente "roja" y, por consiguiente, llega más tarde al extremo de la fibra óptica. Para longitudes de onda mayores que 1,33 micrometros, la parte "azul" llega antes que la parte "roja".

Un problema adicional limita el funcionamiento de la fibra. Se trata de la pérdida óptica de la fibra, es decir, la pérdida de energía de la señal. Esta pérdida se produce como consecuencia de la difusión o absorción de la luz en las impurezas del material que constituye dicha fibra. Por ejemplo, el vidrio de sílice presenta una pérdida importante para una longitud de onda del orden de 1,25 micrometros y otra para una longitud de onda de 1,39 micrometros. Ambas pérdidas se deben a la absorción de la luz por parte de los iones hidroxilo (OH^-) atrapados en el vidrio durante su fabricación. Además de estas pérdidas específicas, la sílice presenta una pérdida general a lo largo de un intervalo amplio que aumenta rápidamente a medida que disminuye la longitud de onda.

Si se pretende reducir al mínimo todos estos problemas es necesario escoger cuidadosamente la luz utilizada. Para evitar la dispersión cromática, la mejor longitud de onda es la de 1,33 micrometros. Para evitar la pérdida óptica es preferible una longitud de onda de 1,55 micrometros, dado que la transparencia de las fibras de sílice de un modo único es máxima para esta longitud de onda. Una estrategia adecuada consistiría en recurrir a la luz monocromática con una longitud de onda de 1,55 micrometros; la dispersión cromática dejaría de ser un problema, puesto que la luz sólo contiene una longitud de







4. EMISION DE LUZ por parte de un semiconductor. Se produce de dos formas diferentes: espontáneamente o por estimulación. En el proceso espontáneo, los electrones de la banda de valencia son excitados a la banda de conducción gracias a la absorción de fotones cuya energía sea superior a la energía de separación entre las bandas (*a*). Los electrones excitados son inestables: al cabo de un tiempo muy pequeño "caen" en la banda de valencia, aniquilando un agujero y liberando un fotón cuya energía es igual a la separación entre las bandas (*b*). La emisión estimulada se consigue utilizando fotones cuya energía es igual a la separación entre las bandas. Estos fotones inducen a los electrones excitados a "caer" en la banda de valencia. Los fotones producidos en la emisión estimulada coinciden con los fotones incidentes tanto en energía como en fase: las ondas de dichos fotones se ajustan entre sí (*c*).

onda y, al mismo tiempo, la transparencia de la fibra óptica sería máxima. Desgraciadamente, ninguno de los láseres de semiconductor actualmente en uso emiten luz con una longitud de onda única. El intervalo de longitudes de onda del pulso de salida de un láser de semiconductor ordinario es del orden de 5 a 10 nanómetros.

Todos los láseres que emplean los actuales sistemas de comunicación óptica son láseres de semiconductor. Estos dispositivos son pequeños (del tamaño de un grano de sal), producen pulsos luminosos a partir de pulsos de corriente eléctrica, sus exigencias eléctricas son modestas (algunos miliampère a uno o dos volt), son capaces de producir luz con longitudes de onda en el infrarrojo, para las cuales la transparencia de fibras ópticas es máxima, y, al contrario de los láseres de gas, son mecánicamente estables y seguros.

Con el fin de comprender la razón por la que el láser C^3 mejora sustancialmente el funcionamiento de los láseres de semiconductor conviene conocer cómo trabajan estos láseres. Como su nombre indica, un semiconductor viene a ser un material cuyas propiedades eléctricas son intermedias entre las de un aislante (en el que los electrones están fuertemente ligados a los átomos) y las de un conductor, tal como un metal (en el que ciertos electrones –los más exteriores en los átomos metálicos– se pueden mover libremente a lo largo de todo el volumen del material). En un semiconductor, los electrones más exteriores están ligados a los átomos, pero pueden liberarse mediante la aportación de una pequeña cantidad de energía.

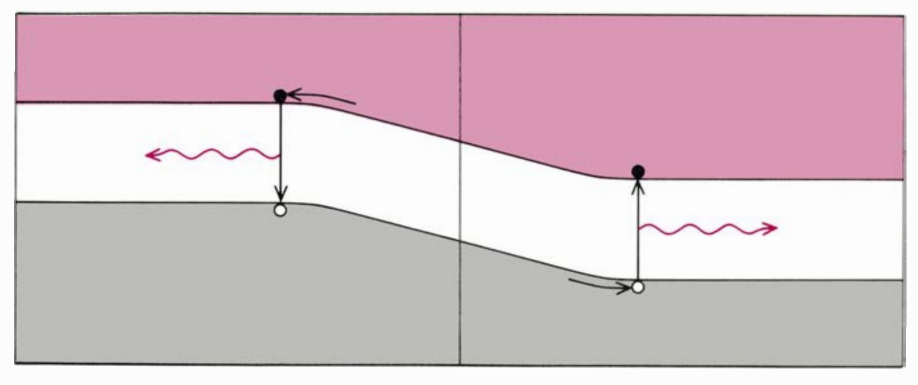
La forma de caracterizar estas diferencias consiste en señalar que en un átomo aislado la cantidad de energía asociada a cada electrón (lo que se conoce como el "nivel" de energía del electrón) está definida con una gran precisión. Sin embargo, en un sólido, los átomos están dispuestos en forma de una estructura periódica; por lo tanto, los niveles individuales forman una serie de bandas anchas de energías permitidas y separadas entre sí por ciertas zonas o intervalos prohibidos. En un metal la banda ocupada más exterior está sólo parcialmente llena de electrones. En consecuencia, existen algunas vacantes disponibles para los electrones libres o portadores de carga. En un aislante la banda ocupada más exterior está completamente llena y entre ella y la siguiente banda vacía existe un intervalo libre muy ancho. Por el contrario, en un semiconductor, la banda ocupada más exterior está también completamente llena (esta banda se denomina banda de valencia), pero el intervalo que la separa de la banda siguiente (conocida como banda de conducción) es muy estrecho.

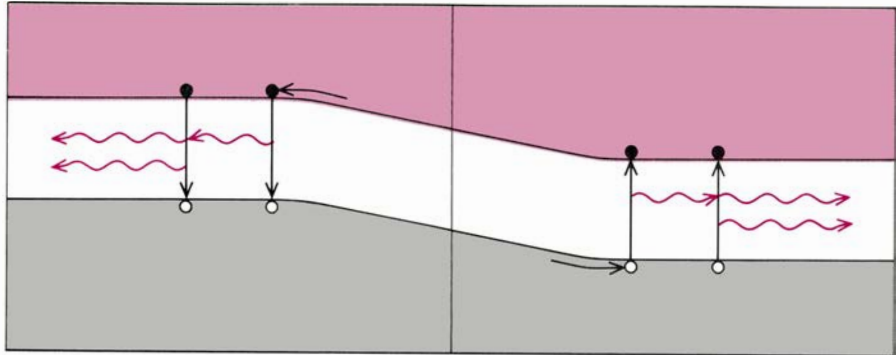
Algunos materiales, así los elementos químicos silicio y germanio o ciertas mezclas de dos elementos diferentes (por ejemplo, indio y fósforo), de tres elementos diferentes (por ejemplo, indio, galio y arsénico) o de más elementos, son semiconductores intrínsecos. Sin embargo, frecuentemente se añaden determinadas impurezas a los semiconductores intrínsecos con el fin de modificar sus propiedades eléctricas y ópticas. Los materiales resultantes se conocen con el nombre de semiconductores extrínsecos. Existen dos clases de estos materiales. En primer lugar tenemos los semiconductores de tipo *n*, en los que los átomos de impurezas conocidas como dadores contribuyen con uno de sus electrones a la banda de conducción [*véase la figura 2*]. La cantidad de energía necesaria para liberar y "promocionar" a este electrón es relativamente pequeña en comparación con la energía del intervalo entre las bandas de valencia y conducción. Dado que el átomo dador pierde un electrón, queda cargado positivamente.

La segunda variedad son los semiconductores de tipo *p*. En este caso, cada uno de los átomos de impurezas conocidos como aceptores capturan un electrón de la banda de valencia y, por tanto, producen un "agujero" o hueco en dicha banda (ausencia de un electrón). El hueco se comporta en todos los sentidos como si fuera una carga positiva. Por su parte, el aceptor queda cargado negativamente.

El material más importante de la moderna electrónica de estado sólido es la unión *p-n*, es decir, la transformación de un semiconductor de tipo *p* en un semiconductor de tipo *n* a lo largo de una distancia extremadamente pequeña. Por ejemplo, un transistor es un material *p-n-p* o un material *n-p-n*. Para comprender la forma cómo trabaja una unión vamos a ver lo que sucede en el instante en que el material *p* y el material *n* se ponen en contacto [*véase la figura 3*]. En ese instante el lado *n* tiene un exceso de electrones libres; el lado *p* posee un exceso de agujeros. En consecuencia, al ser sometidos a un gradiente de concentración, los electrones tienden a difundirse hacia el lado *p*; por su parte, los agujeros tienden a difundirse hacia el lado *n*.

Cuando un electrón se encuentra con un agujero o hueco en un semiconductor ideal se recombina con él. Por lo tanto, los portadores de carga (electrones y huecos) tienden a desaparecer de las proximidades de la unión. El lado *p* queda con un exceso de átomos aceptores; sus posiciones –y las cargas negativas– permanecen fijas en la red cristali-





5. EMISION DE LUZ por una unión P-N bajo la acción de una diferencia de potencial aplicada a ella. Este voltaje compensa el campo eléctrico existente en la unión. Como resultado, electrones y agujeros se difunden a través de la unión y se recombinan, emitiendo fotones por emisión espontánea (*figura superior*). Si el voltaje aplicado anula por entero el campo eléctrico, se puede producir una emisión estimulada (*figura inferior*) siempre y cuando haya sido excitado un número suficiente de electrones.

na. Como resultado de este proceso, en las proximidades de la unión aparece un campo eléctrico que se opone a la ulterior difusión de electrones o agujeros.

Este dispositivo puede servir de base para un láser. El punto crucial radica en que en un semiconductor pueden producirse tres procesos ópticos básicos: absorción espontánea, emisión espontánea y emisión estimulada [*véase la figura 4*]. En los procesos espontáneos un portador de carga eléctrica (un electrón o agujero) absorbe o emite un fotón cuando se mueve de una banda a otra. La energía de este fotón es igual a la energía del intervalo de separación entre las bandas. La longitud de onda de un fotón es una medida de su energía; por tanto, la longitud de onda de la radiación absorbida o emitida por un semiconductor dependerá de la elección del material semiconductor en particular. Supongamos que un electrón de la banda de valencia absorbe un fotón cuya energía es mayor que dicho intervalo. El electrón será excitado hasta la banda de conducción, dejando un hueco en la banda de valencia. Supongamos ahora que el electrón está en la banda de conducción; este electrón está en un estado excitado, lo que quiere decir que es inestable. Al cabo de un tiempo corto y sin que se requiera la presencia de un estímulo externo, sufrirá una transición hasta la banda de valencia, en la cual aniquilará un hueco y se producirá la emisión de un fotón cuya energía será exactamente igual a la del intervalo entre las dos bandas.

El tercer proceso básico –emisión estimulada– es fundamental para la acción de un láser. Este proceso tiene lugar cuando un fotón con una energía exactamente igual a la del intervalo entre las bandas interacciona con los electrones de la banda de conducción. En este caso, uno de los electrones de la banda de conducción será inducido a llevar a cabo una transición hasta la banda de valencia y, por tanto, se producirá la emisión de un fotón. Es importante destacar el hecho de que el fotón incidente y el fotón emitido no sólo tienen la misma energía, sino también la misma fase. En otras palabras, las crestas y los valles de sus respectivas ondas coinciden. Deberíamos decir que la emisión de fotones se puede producir a partir de las transiciones entre una banda y el nivel de energía ocupado por un átomo de impureza o incluso a partir de las transiciones entre dos niveles de impurezas. Por otra parte, las energías de los portadores de cargas en la banda de conducción y en la banda de valencia obedecen a una distribución estadística. Más aun, los niveles energéticos de los átomos de impurezas forman bandas de energía estrechas. Por todas estas razones la radiación electromagnética emitida por un semiconductor está constituida por una serie de longitudes de onda diferentes y no por una longitud de onda única definida por el intervalo entre las bandas.

Una unión *p-n* puede ser un emisor de luz excelente; tan sólo se necesita conectar la unión a una fuente de energía eléctrica. La corriente establece una diferencia de potencial a lo largo de la unión; este voltaje contrarresta en parte el campo eléctrico intrínseco de la unión. De esta forma, la barrera de energía que impide el flujo de electrones y agujeros se reduce [*véase la figura 5*] y, en consecuencia, los electrones se mueven desde el lado *n* al lado *p*, donde se recombinan con los agujeros y se emite espontáneamente un fotón. En un proceso similar, se producen también fotones cuando los huecos se mueven desde el lado *p* al lado *n* y se recombinan con los electrones que se encuentran allí. Si la diferencia de potencial aplicado permite eliminar la barrera de energía, un gran número de portadores de carga serán capaces de remontar dicha barrera; el flujo resultante de portadores de carga da lugar a una distribución conocida como inversión de las poblaciones. Más importante, el número de fotones emitidos en las proximidades de la unión, es decir, en la región que se conoce con el nombre de capa activa del cristal de semiconductor, se hace tan grande que se produce una emisión estimulada. Si la corriente cesa, la emisión de fotones se detiene. El semiconductor emite, pues, pulsos de luz en respuesta a los pulsos de corriente, comportándose como un transductor o convertidor de señales eléctricas en señales ópticas.

Para que este dispositivo se convierta en un láser debe cumplirse también otra condición: dos de las caras del cristal perpendiculares a la unión *p-n* deben ser planas y perfectamente paralelas entre sí [*véase la figura 6*]. En tal caso, dichas caras se comportan como un par de espejos semitransparentes en los que se reflejan los fotones originados en la unión y retornan a la capa activa. Cuando los fotones atraviesan esta región producen una avalancha por emisión estimulada. Dicho en otras palabras, los fotones amplifican la luz. (En realidad, la palabra láser esta formada por las iniciales de una serie de palabras en inglés cuyo significado literal es "amplificación de luz por emisión estimulada de radiación".) Los fotones que escapan del semiconductor a través de los espejos semitransparentes constituyen el haz del láser.

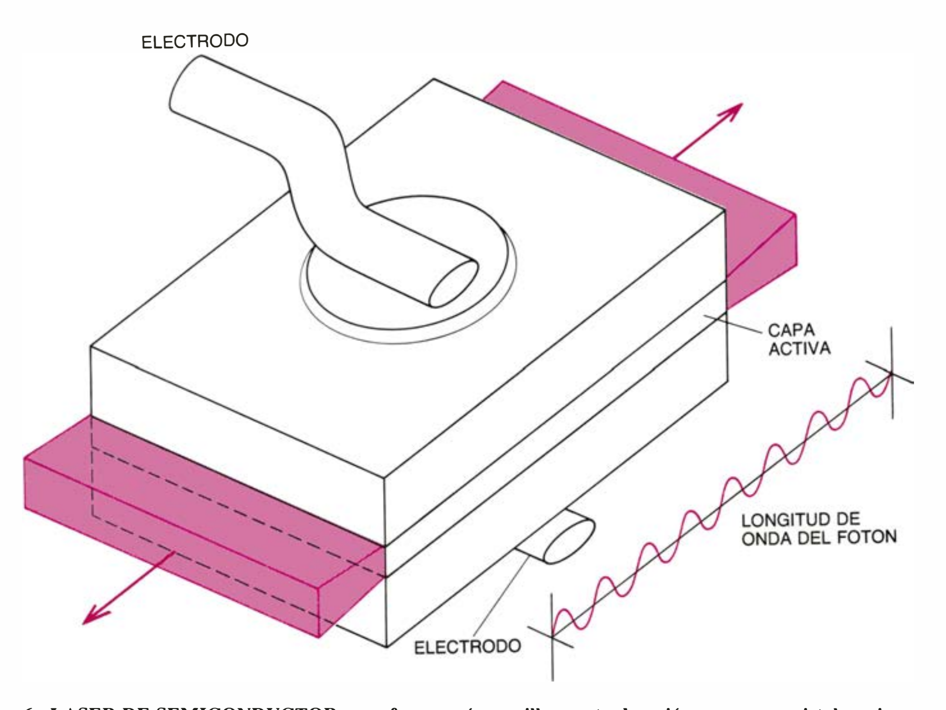
Los espejos semitransparentes a los que nos estamos refiriendo constituyen una versión moderna de un instrumento inventado en 1896 por los físicos franceses Charles Fabry y Alfred Perot. Por lo tanto, las limitaciones que presentaba dicho instrumento (conocido actualmente como cavidad resonante de Fabry-Perot) se aplican también al láser. En particular, la luz reflejada por los espejos sólo puede autorreforzarse si la luz y su reflexión están en fase, es decir, si la longitud de onda de la luz se ajusta completamente dentro de la longitud del láser, o mejor dicho, en su longitud efectiva (la longitud efectiva es igual a la longitud medida multiplicada por el índice de refracción del material existente entre los espejos). Aquellas longitudes de onda que satisfacen esta condición se conocen con el nombre de resonantes. Todas las restantes longitudes de onda resultan eliminadas. En principio hay infinitas longitudes de onda resonantes, pero dado que una unión *p-n* particular sólo genera luz en un intervalo limitado de longitudes de onda (conocido como el perfil de ganancia del láser), el haz emitido por el láser estará constituido únicamente por aquellas longitudes de onda resonantes que se sitúen dentro de dicho intervalo. Las dos caras laterales de un láser de semiconductor suelen estar separadas entre 200 y 400 micrometros. Si el láser está diseñado para emitir luz con una longitud de onda de 1,55 micrometros, emitirá realmente toda una serie de longitudes de onda resonantes que diferirán entre sí en unos "espaciados de los modos" del orden de uno o dos nanómetros. Una vez se ha escogido el material de la capa activa, las longitudes de onda ya no se pueden alterar.

La naturaleza de los láseres de semiconductor no está gobernada únicamente por la física. Ciertos detalles técnicos influyen también en su diseño. Por ejemplo, la vida útil de un láser de semiconductor depende de la corriente aplicada al dispositivo. Para limitar dicha corriente se siguen varios métodos. Consiste uno en introducir en el cristal ciertos elementos químicos de forma tal que la capa activa del láser quede en aquellas regiones donde la separación entre las bandas sea particularmente grande. La "heteroestructura" resultante posee ciertas barreras energéticas propias que ayudan a impedir la difusión de portadores de carga fuera de la capa activa. La emisión estimulada se puede alcanzar entonces con valores bastante bajos de la corriente aplicada. La capa activa puede adquirir la forma de un tubo estrecho rodeado enteramente por materiales cuya separación entre las bandas de conducción y de valencia sea notable. Los dispositivos en cuestión se conocen con el nombre de láseres de heteroestructura encerrada.

La naturaleza ha sido amable: el índice de refracción de la capa activa resulta ser mayor que el del material con gran separación entre las bandas que la rodea. En virtud de ello, la capa activa en forma de tubo de uno de estos láseres de heteroestructura encerrada se comporta como el núcleo de una fibra óptica: la luz generada en la capa activa se propaga a lo largo del tubo. Esta canalización de la luz resulta muy valiosa, pues el proceso de emisión estimulada exige la interacción de los fotones con los portadores de carga excitados. Los avances en el diseño de los láseres de semiconductor y el desarrollo de las técnicas de fabricación y crecimiento de cristales de gran calidad permiten construir láseres capaces de operar a temperaturas ambientes durante más de un millón de horas con corrientes tan bajas como 2,5 miliampère y diferencias de potencial de uno a dos volt.

Sin embargo, el láser de heteroestructura encerrada no es el más adecuado para la comunicación óptica. La razón estriba en que el haz de este tipo de láser salta también al azar entre todas las longitudes de onda resonantes disponibles. Este salto se conoce con el nombre de partición entre los modos y plantea muchos problemas cuando el láser se enciende y apaga rápidamente con la intención de codificar la información bajo la forma de pulsos luminosos. La existencia del fenómeno del salto no puede despreciarse en los sistemas modernos de comunicación óptica, en los que el error tolerable es de un bit en 10^9 o incluso un bit en 10^{11}. Supongamos que las longitudes de onda de dos pulsos de luz emitidos por un láser diseñado para operar a 1,55 micrometros (es decir, 1550 nanómetros) difieren en dos nanómetros (el espaciado de los modos de un láser cuya longitud de la cavidad resonante sea de 250 micrometros).

Concedamos que estos pulsos recorren una distancia de 100 kilómetros a través de una fibra óptica de modo único cuyo núcleo sea de sílice. Debido a la dispersión cromática, el tiempo de transmisión para el impulso relativamente "azul" (cuya longitud de onda es de 1548 nanómetros) será 3,5 nanosegundos menor que el tiempo de transmisión del pulso relativamente "rojo" (cuya longitud de onda es de 1552 nanómetros). Como consecuencia, la capacidad del sistema para transportar información estará limitada a un máximo de 150 millones de bits por segundo; en caso contrario, los pulsos se mezclarán unos con otros. Centenares de millones de bits por segundo puede parecer un número desorbitado. En realidad, el objetivo de las líneas de comunicación



6. LASER DE SEMICONDUCTOR cuya forma más sencilla consta de unión *p-n* en un cristal semiconductor de caras laterales planas y perfectamente paralelas. Dichas caras se comportan como un par de espejos semitransparentes que envían una y otra vez a los fotones que se reflejan en ellas hacia la "capa activa" del cristal. Los primeros fotones se originan por emisión espontánea al inyectar una corriente. Los fotones que atraviesan el semiconductor producen una avalancha por emisión estimulada. Las reflexiones en los espejos se autorrefuerzan siempre que la longitud de onda de los fotones se ajusta exactamente dentro de la longitud del láser. A la derecha de la figura se representa un ejemplo de esta condición.

óptica modernas se sitúa en el orden de los mil millones de bits por segundo.

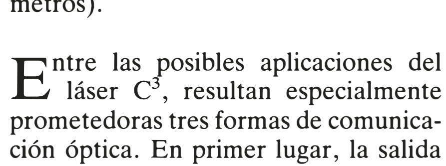
La necesidad de disponer de sistemas de comunicación óptica de capacidad ultraelevada para grandes distancias ha conducido al desarrollo del láser C^3, un dispositivo que no sólo emite el haz más puro que se conoce cuando se trabaja a frecuencias de 2000 millones de pulsos por segundo, sino que además es el primer láser de longitud de onda pura que se puede ajustar electrónicamente para un intervalo de longitudes de onda de salida muy amplio.

El láser C^3 consiste en dos láseres de semiconductor cuyas longitudes difieren, por ejemplo, en un 20 por ciento. En virtud de esa diferencia, el espaciado de sus longitudes de onda resonantes será también distinto. Los dos láseres se colocan uno junto al otro, con sus capas activas alineadas, de forma tal que el haz emitido por cada uno de ellos entre en el otro [*véase la figura 9*]. La luz emitida por cualquiera de los dos láseres es suprimida por el otro, a no ser que la longitud de onda sea resonante para ambos. De hecho, el haz de salida será confinado de forma casi perfecta (nada es absolutamente cierto en mecánica cuántica) para una longitud de onda única: la resonancia se produce cerca del máximo del perfil de ganancia de los láseres [*véase la figura 10*]. De esta forma, el problema de la partición de modos deja de existir.

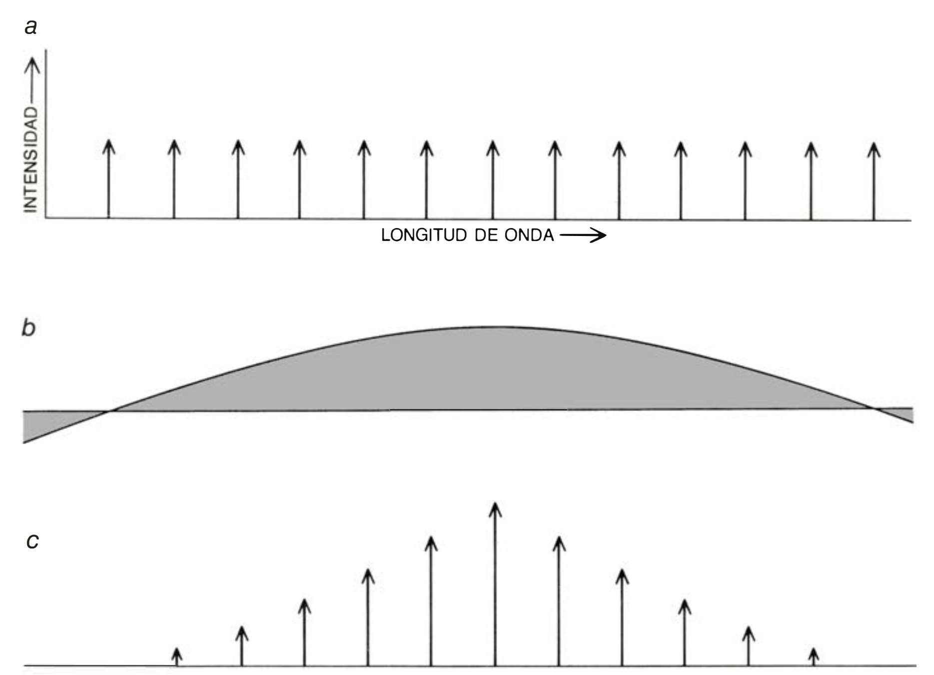
¿Cómo se ajusta un láser C^3? Inyectando corriente en uno de los láseres. Característica fundamental del láser C^3 es que los dos láseres que lo constituyen están acoplados ópticamente pero aislados eléctricamente: cada uno recibe su propia corriente. Supongamos ahora que la corriente que recibe uno de ellos lo coloca por encima de su nivel umbral de funcionamiento (corriente mínima capaz de producir una inversión de poblaciones y emisión estimulada). Las posiciones de sus modos resonantes quedan entonces fijadas. Entretanto, el segundo láser recibe una corriente que lo mantiene por debajo de su nivel umbral. Bajo esta condición, dicha corriente sirve sólo para controlar la densidad de los portadores de carga en la capa activa del segundo láser. (Si este segundo se encontrara por encima del nivel umbral, la aplicación de una corriente eléctrica serviría para aumentar la emisión estimulada de fotones.) La densidad de portadores de carga determina el índice de refracción del láser. A su vez, el índice de refracción gobierna la longitud efectiva del láser; y la longitud efectiva gobierna las longitudes de onda resonantes. En suma, variando la corriente aplicada al segundo láser se ajustan las longitudes de onda resonantes de este láser con relación a las del primero. Como resultado de este proceso, las resonancias que estaban ajustadas dejan de estarlo y se ajustan otras en su lugar.

En los laboratorios Bell hemos sintonizado un láser C^3 de 1,55 micrometros a 15 longitudes de onda diferentes en un intervalo de 30 nanómetros. Cada uno de los ajustes sucesivos exigía un cambio en la corriente suministrada al láser por debajo del umbral de algo más de un miliampère; el tiempo de conexión era del orden de mil millonésimas de segundo. La partición de modos estaba virtualmente ausente, puesto que se producía menos de una vez cada 10.000 millones de muestras del haz. (El error máximo permitido a los sistemas de comunicación modernos, de capacidad ultraelevada y distancias muy grandes es de un bit incorrecto por cada mil millones de bits de información transmitida.) El láser se mantenía en cualquiera de sus longitudes de onda propias, dejando constante la corriente aplicada al segundo láser. Para generar pulsos ópticos, el primer láser se mantenía por encima de su nivel umbral y se le aplicaba una sucesión de pulsos eléctricos. Cuando la corriente eléctrica aplicada al segundo láser alcanzaba una determinada intensidad, dicho láser se situaba también por encima de su nivel umbral. Como consecuencia, la posibilidad de ajuste dejaba de existir. A partir de aquí, el láser C^3 funciona con una longitud de onda única, aunque se produzcan nuevos aumentos en la corriente eléctrica aplicada.

El láser C^3 se obtiene dividiendo en dos partes un láser de semiconductor ordinario a lo largo de un plano cristalino paralelo a sus caras laterales. El resultado de la división es dos láseres más cortos. Por separado, cada uno de ellos sería un láser convencional. En realidad los dos láseres no están aislados entre sí. Una de las superficies del láser original paralela a la unión *p-n* está recubierta por una capa de oro de tres micrometros de espesor. Esta capa no resulta afectada por la separación y sirve de unión entre las dos mitades del láser, cuyas capas activas están alineadas con gran precisión y con una capa de aire de algunos micrometros de espesor entre ellas. Contrariamente a lo que se temía cuando se ensayó por vez primera esta disposición, el espesor de la capa de aire y la diferencia precisa entre las longitudes de los dos láseres no afectaban el funcionamiento del dispositivo de forma crítica. Esta técnica se puede aplicar a la fabricación de láseres de muchos materiales diferentes capaces de emitir longitudes de onda desde la región del espectro visible (del orden de 0,7 micrometros) hasta el infrarrojo lejano (del orden de 30 micrometros).



Entre las posibles aplicaciones del láser C^3, resultan especialmente prometedoras tres formas de comunicación óptica. En primer lugar, la salida



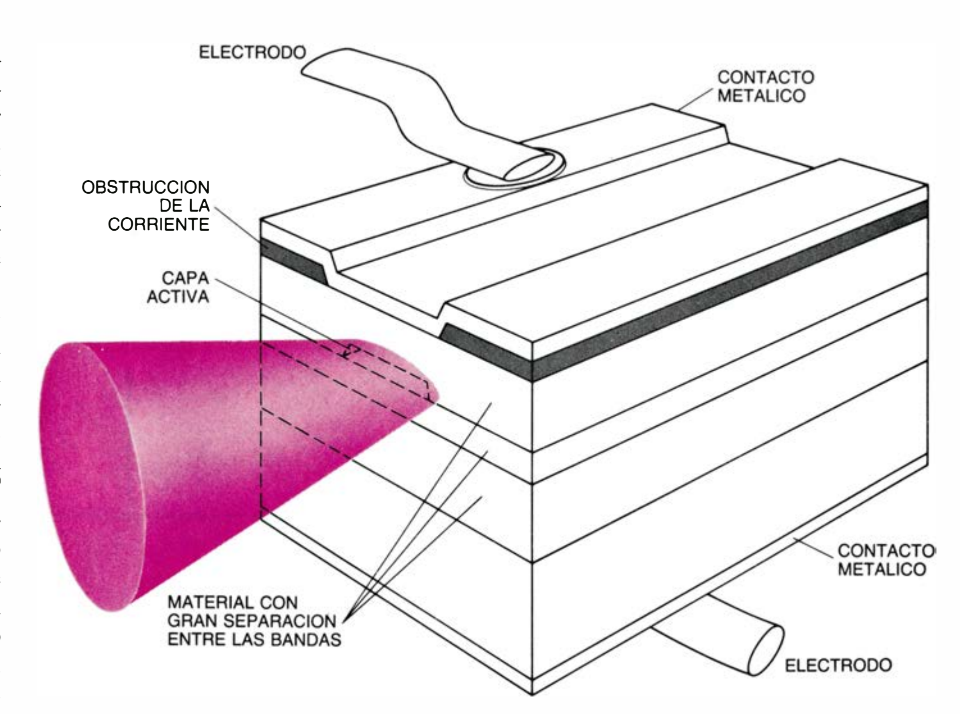
7. DIAGRAMA DE ENERGIAS de un láser de semiconductor. Explica por qué el haz de salida del láser salta al azar entre varias longitudes de onda. En principio, el láser resuena para un número infinito de longitudes de onda que se ajustan en la longitud del láser (*a*). Sin embargo, la unión *p-n* produce fotones sólo en un intervalo estrecho de longitudes de onda conocido como perfil de ganancia (*b*). El haz emitido por el láser incluye tan sólo las longitudes de onda resonantes que se sitúan dentro de dicho perfil (*c*).

extraordinariamente monocromática de un láser C^3 elimina el problema de la dispersión cromática en las fibras ópticas y, por tanto, facilita la transmisión de información digital en una fibra de modo único para una longitud de onda de 1,55 micrometros, es decir, la longitud de onda para la que una fibra de sílice es más transparente a la radiación electromagnética. En un ensayo llevado a cabo en los laboratorios Bell con el fin de investigar las posibilidades del láser de 1,55 micrometros, se ha transmitido información digital a lo largo de más de 120 kilómetros de fibra óptica con una velocidad de un gigabit (10^9 bits) por segundo, sin necesidad de proceder a reamplificación alguna en dicho recorrido. La frecuencia de error fue menor que dos bits en 10^{10}. Con esta velocidad se podría transmitir el texto íntegro de la Enciclopedia Británica en menos de medio segundo y el texto se recibiría virtualmente sin error (contando como error una sola letra o signo de puntuación equivocado). En una experiencia posterior, llevada a cabo también en los laboratorios Bell, se transmitió una información digital a lo largo de 160 kilómetros con una velocidad de 420 megabits (420×10^6 bits) por segundo sin reamplificación. La frecuencia de error no llegaba a 5 bits en 10^{10}.

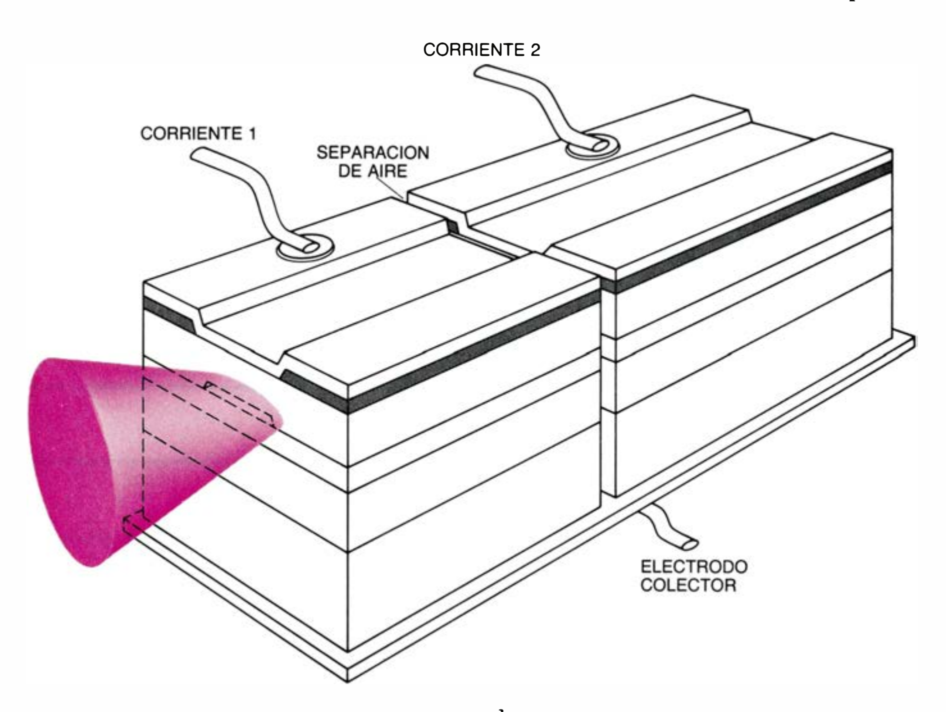
La segunda aplicación de los láseres C^3 en la comunicación óptica se basa en la división múltiple de las longitudes de onda. En este caso, los haces emergentes de varios láseres C^3, cada uno de los cuales estaba ajustado a una longitud de onda diferente, se acoplan a una única fibra óptica. De este modo, la fibra puede transportar simultáneamente varios mensajes independientes.

La tercera aplicación destaca de forma más espectacular la capacidad de las fibras ópticas para transportar información. Para frecuencias del orden de mil millones de encendidos y apagados por segundo se puede seleccionar la longitud de onda de salida de un láser C^3 entre más de 15 modos diferentes separados entre sí unos dos nanómetros. De este modo, la transmisión de información con una longitud de onda única, con pulsos de alta y baja energía que representan a los dígitos binarios 1 y 0, respectivamente, conduce a la transmisión de longitud de onda múltiple. En la posibilidad más simple se emplean dos longitudes de onda diferentes para representar el 1 y el 0. Un esquema más complejo se basa en la utilización de cuatro longitudes de onda diferentes. Un pulso único tendría un significado de datos binarios 00, 01, 11 o 10, según la longitud de onda. En consecuencia, cada pulso transportaría dos bits de información. La utilización de ocho longitudes de onda haría posible que un solo pulso transportara tres bits de información.

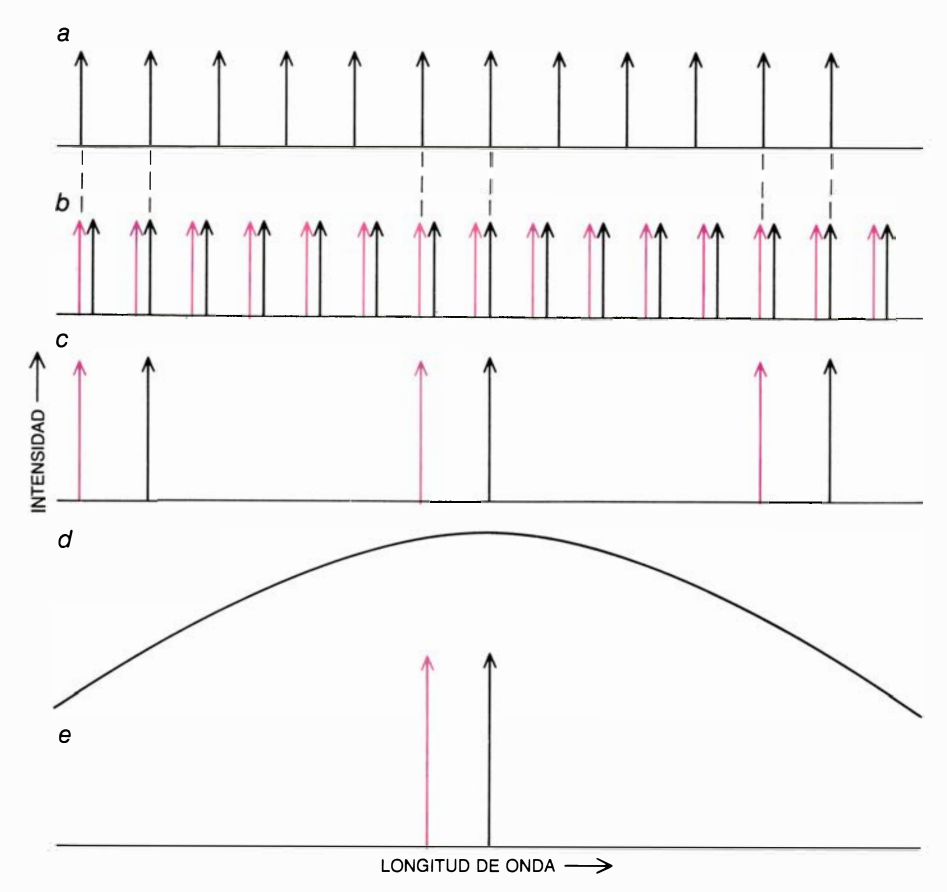
Además de la comunicación óptica existen otras posibilidades en las que los láseres C^3 pueden llevar a cabo las operaciones lógicas y de encendido/apagado que se realizan actualmente por medios electrónicos. Estas posibilidades se basan en el aislamiento eléctrico de las dos mitades de láser que constituyen un láser C^3. Cada uno de esos dos láseres recibe un tren de pulsos



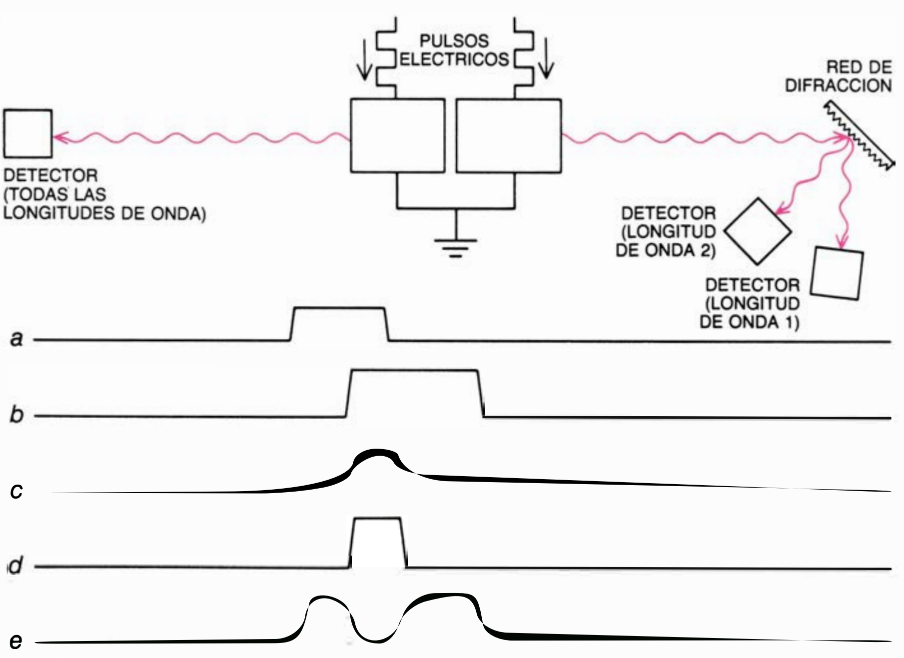
8. LASER DE HETEROESTRUCTURA ENCERRADA, que mejora el funcionamiento del láser de semiconductor ordinario. Este láser reduce la unión *p-n* a un "tubo" que discurre a lo largo del cristal de semiconductor. Dicho tubo está rodeado por capas de semiconductor con una separación entre las bandas grande, lo que origina una barrera eléctrica que confina a los portadores de carga dentro del tubo. El material en cuestión confina también a los fotones producidos en la unión. El haz del láser sufre una dispersión en virtud de la difracción que se produce cuando el haz emerge por una de las caras.



9. DOS LASERES ALINEADOS constituyen el láser C^3, de gran pureza. Los láseres componentes tienen longitudes diferentes; por tanto, sus longitudes de onda resonantes presentan espaciados distintos; y solamente algunas de ellas coinciden. Las longitudes de onda que no coinciden son eliminadas. Por otra parte, entre aquellas que coinciden, tan sólo una se sitúa próxima al máximo de ganancia. En consecuencia, el haz de un láser C^3 está constituido, de manera exclusiva, por esa longitud de onda. La probabilidad de que el haz salte a otra longitud de onda es menor que uno en diez mil millones de muestras del haz.



10. ASI SE AJUSTA UN LASER C³: mediante una corriente. La llegada de una corriente a uno de los dos láseres lo sitúa por encima de su nivel umbral y quedan, pues, fijados (*esquema a*) los modos resonantes. El segundo láser se mantiene por debajo de su nivel umbral. A pesar de ello, posee ciertos modos resonantes (*líneas negras en el esquema b*) y algunos de ellos (*líneas negras en c*) se ajustan a los modos del láser que emite luz. El ajuste en el máximo del perfil de ganancia del láser (*d*) determina la longitud de onda del haz emergente del láser C³ (*diagrama e*). Se varía a continuación la corriente aplicada al segundo láser. Este cambio modifica sus modos resonantes (*líneas coloreadas en b*). Se establece un nuevo conjunto de resonancias (*líneas coloreadas en c*) y se produce una nueva longitud de onda emergente.



11. CIRCUITOS LOGICOS OPTICOS, una de las posibles aplicaciones futuras de los láseres C³. Estos circuitos se basan en la posibilidad de ajuste y en el aislamiento eléctrico de las dos mitades que constituyen un láser C³. Sendos trenes de pulsos eléctricos independientes (*a, b*) se aplican a las dos partes del láser. La llegada de dos pulsos simultáneos produce la emisión de luz de longitud de onda *1*. La llegada de un pulso a una de las dos mitades del láser da lugar a la emisión de luz de longitud de onda *2*. La detección de la luz para ambas longitudes de onda corresponde a la operación lógica *o* (*c*). La detección de la longitud de onda *1* corresponde a la operación lógica *y* (*d*). La detección de la longitud de onda 2 corresponde a la operación lógica *o* tomada en un sentido *excluyente*. (Esquema de Patricia J. Wynne.)

eléctricos [*véase la figura 11*]. Cuando un pulso de corriente llega simultáneamente a ambas mitades del láser, el C^3 emite un pulso de luz con una cierta longitud de onda (longitud de onda 1). Cuando el pulso de corriente llega a una de las dos mitades, pero no a la otra, el láser C^3 emite un pulso de luz con una longitud de onda diferente (longitud de onda 2). Si no llegan pulsos de corriente, no se producen pulsos de luz.

El haz pulsante de luz que emerge por uno de los extremos del láser C^3 se dirige hacia un fotodetector sensible a todas las longitudes de onda. Por consiguiente, el fotodetector señala si una de las dos mitades o ambas mitades del láser han recibido el pulso eléctrico. El detector está llevando a cabo la operación lógica conocida como *o* (disyunción). Entretanto, el haz pulsante que emerge por el otro lado del C^3 se dirige hacia una red de difracción que dispersa la luz en un abanico de longitudes de onda diferentes. Un par de fotodetectores detecta entonces la longitud de onda 1 y la longitud de onda 2, por separado. La presencia de la longitud de onda 1 indica que ambas mitades del láser están recibiendo un pulso de corriente eléctrica; en consecuencia, el detector de la longitud de onda 1 lleva a cabo la operación lógica *y* (conjunción). La presencia de la longitud de onda 2 indica que una mitad del láser o la otra –pero no ambas– está recibiendo un pulso de corriente eléctrica. Esta es la operación lógica *o* en sentido excluyente (*disyunción excluyente*).

Este esquema presenta varias ventajas. Ante todo, es capaz de proporcionar numerosas salidas lógicas a partir de dos únicas señales eléctricas. Por otra parte, es rápido: el tiempo de conexión para un láser C^3 es del orden de un nanosegundo y, por lo tanto, el procesado de información en la región del gigabit por segundo es perfectamente posible. Por último, el esquema proporciona una salida óptica a partir de una entrada eléctrica; por consiguiente, puede ser utilizado como un transductor electrónico-óptico. Las aplicaciones derivadas de la lógica óptica y la conexión pueden estar todavía reservadas al futuro. En cualquier caso, está claro que los semiconductores desempeñarán un papel fundamental en dichas aplicaciones. El láser C^3 se basa directamente en el láser de semiconductor convencional y sus características y posibilidades pueden llegar a ser muy importantes en todos estos sentidos.

Viviendas de huesos de mamut en la llanura rusa

Las levantaron bandas de cazadores y recolectores paleolíticos hace 15.000 años. Su complejidad y permanencia sugieren el advenimiento de un profundo cambio de la estructura social a finales de la edad glacial

Mikhail I. Gladkih, Ninelj L. Kornietz y Olga Soffer

G. S. Kiryakov, miembro de la aristocracia local del pueblo de Gontsy, en la actual República de Ucrania, de la Unión Soviética, ordenó, en 1871, una excavación en tierras de su propiedad cercanas al casco urbano. No habían cavado mucho los obreros cuando toparon con unos curiosos huesos, de gran tamaño. Comprobado que eran de mamut, animal extinguido en Ucrania desde hace unos 10.000 años, Kiryakov los donó al instituto de enseñanza media como curiosidad.

El profesor de historia del centro se entusiasmó con el hallazgo y prosiguió la excavación por su cuenta, ayudado por un geólogo de Kiev. Los dos arqueólogos aficionados encontraron, en el lugar del hallazgo, los restos de un asentamiento paleolítico. Las técnicas de excavación de la época eran bastante rudimentarias; se supuso que los huesos eran restos de mamut paleolíticos, abandonados por cazadores tras arrancarles la carne.

Hasta la segunda década del siglo no se dispuso de mejores métodos con los que estudiar los yacimientos óseos. Entre las innovaciones se contaba la excavación del área entera ocupada por una comunidad, en vez de limitarse a pequeñas zanjas, como había sido la práctica hasta entonces. Al aplicar esas nuevas técnicas en Gontsy, y en otros puntos, se comprobó que los huesos de mamut, amén de restos de comida, cumplían una misión especial: constituían la materia estructural para un estilo de construcción extraordinario. Las estructuras de huesos de mamut solían ser de traza redonda u oval; cráneos, mandíbulas, escápulas y otros huesos cementaban los fundamentos, mientras que la superestructura debió levantarse con un armazón de madera cubierto de pieles o ramajes.

Hay en Ucrania, que se sepa, una docena de habitáculos de huesos de mamut. Uno de los más interesantes salió a la luz a finales de la década de 1960, en las cercanías de la ciudad de Mezhirich. En él trabajó, desde su descubrimiento, Ivan Pidoplichko, de la Academia de Ciencias de la Unión Soviética, fallecido en 1975. Desde entonces hemos tomado su relevo. Según nuestros hallazgos, el lugar constituyó el campamento de invierno de una próspera banda de recolectores y cazadores paleolíticos. Los cazadores debieron llegar a Mezhirich hace unos 15.000 años; construyeron no menos de cinco viviendas de huesos de mamut. Las pruebas recogidas parecen sugerir que la comunidad había desarrollado una serie de mecanismos para canalizar en proyectos específicos el tiempo que no necesitaba dedicar a asegurarse la propia existencia. Parece que también llegaron a disponer de modos de resolver sus disputas. El desarrollo de tales mecanismos constituyó indudablemente una fase de la mayor importancia en la prehistoria. Los trabajos efectuados en Mezhirich, por tanto, nos informan de los albores de la sociedad humana.

Mezhirich se halla en la República de Ucrania, al igual que otras comunidades de huesos de mamut y muchos asentamientos del Pleistoceno que carecen de esas construcciones. Algunos se conocen también en las repúblicas bielorrusa y rusa. Las tres repúblicas forman parte de la llanura central rusa, que se extiende desde el pie de los Cárpatos, por el oeste, hasta los montes Urales, por el este, y ocupa la mitad sur de la Unión Soviética europea. Drenan esa amplia zona tres grandes sistemas fluviales: Dniéster, Don y Dniéper, que corren, sur abajo, hacia el mar Negro y el mar de Azov.

La mayoría de los asentamientos paleolíticos de la región se encuentran cerca de un río; los agrupados en torno a cada uno de los grandes sistemas fluviales parecen mostrar cierta unidad cultural. Los centros con viviendas de huesos de mamut prefieren la proximidad del Dniéper y sus afluentes.

Los que se sitúan a lo largo del Dniéper muestran semejanzas de cultura y posición geográfica original. Todos ellos están enterrados en depósitos geológicos situados en las terrazas de los ríos o en el borde de una plataforma adyacente a sus valles. Los sedimentos que recubren los restos culturales son de dos tipos: loess y colluvium. El loess es un polvo fino depositado por el viento durante los períodos fríos y secos de la edad glacial. Por colluvium se entiende cualquier material que se deslice desde un promontorio cercano a un río hasta su orilla; suele ser menos fino que el loess.

Gracias al loess, los restos de asentamientos humanos se conservan en buen estado: se deposita rápidamente, no es ácido y resulta impermeable a muchas sustancias que destruyen restos orgánicos. Los asentamientos en torno al Dniéper aparecen a menudo bajo más de diez metros de loess; su conservación es muy buena. El material sedimentó durante la época más fría de la edad glacial, el período denominado Valdai en la Unión Soviética. La glaciación de Valdai duró aproximadamente desde el año 100.000 hasta el 10.000 antes de la actualidad. En su momento de mayor crudeza, hace unos 20.000 años, el escudo de hielo de Escandinavia cubría todo el norte de Rusia, extendiéndose casi hasta el paralelo 55.

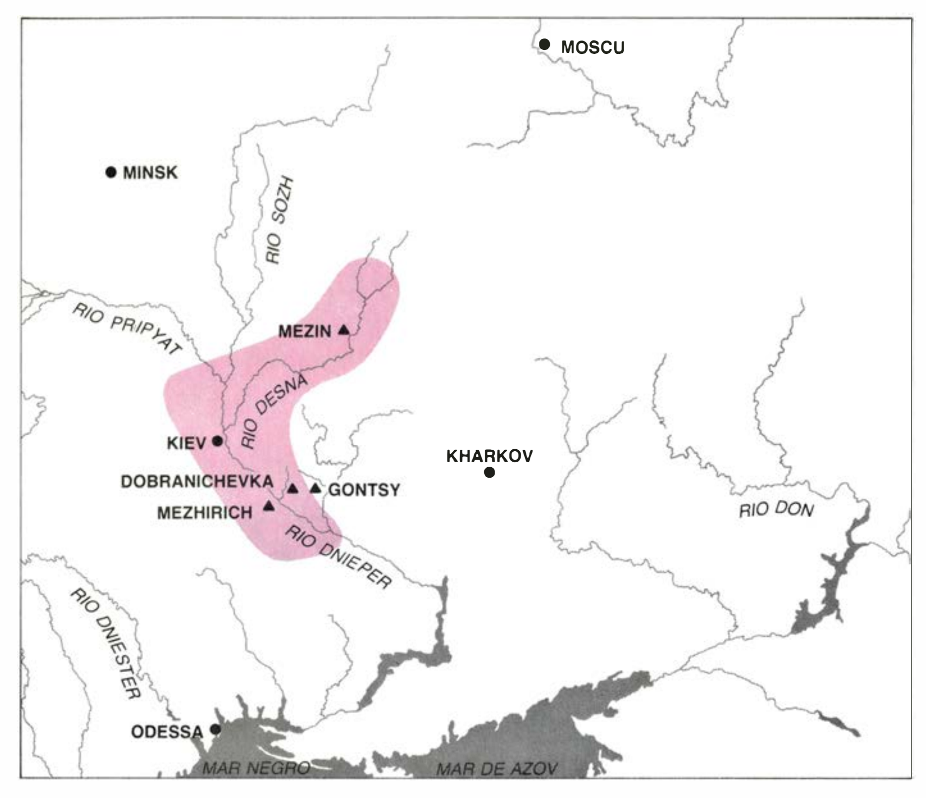
Las comunidades humanas que habitaban la llanura rusa durante el Valdai debieron padecer considerables fluc-

tuaciones climáticas. Algunas pruebas señalan que a lo largo de la etapa más tardía (hace unos 18.000 años), la temperatura media subió y bajó en ciclos de unos 1000 años. Períodos estadiales fríos y secos alternaron con otros interestadiales, más calientes y húmedos. Durante los estadiales las temperaturas medias de enero quizás alcanzaran los 35 o 40 grados Celsius bajo cero. Las temperaturas medias de julio rondarían los 18 grados sobre cero.

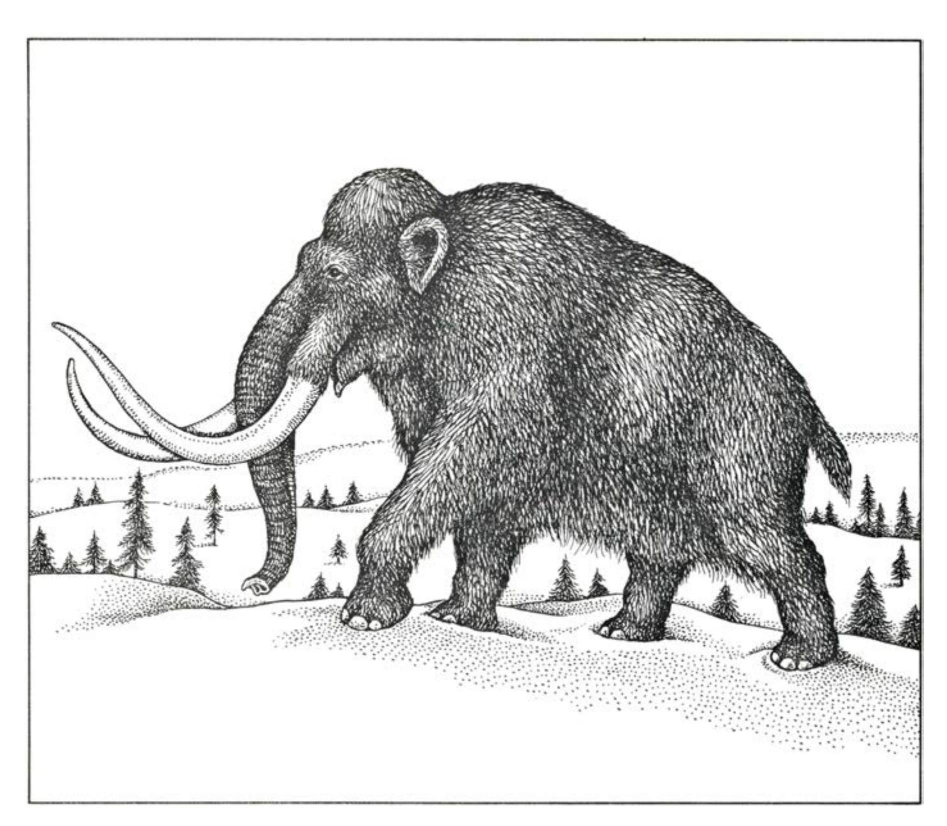
El suelo estaba permanentemente helado, a excepción de una capa superficial de deshielo en verano. El estrato de hielo empezaba a metro y medio de profundidad y se extendía hacia abajo. Esas capas de hielo perpetuo y de deshielo desempeñaron un importante papel en el almacenamiento de provisiones por parte de los habitantes.



1. VIVIENDA DE HUESOS DE MAMUT desenterrada cerca del pueblo de Mezhirich, en la República de Ucrania, Unión Soviética. Se ha reconstruido bajo la supervisión del académico Ivan Pidoplichko. La figura superior ilustra la entrada; abajo, la parte posterior del habitáculo. La estructura medía unos cinco metros de diámetro en su base. La levantó un grupo paleolítico cazador-recolector. Con cráneos dispuestos en semicírculo se formaron los fundamentos. La porción exterior y superior del muro constaba de 95 mandíbulas colocadas con el mentón hacia abajo. El techo debió construirse con pieles, que recubrían un armazón de madera, fijadas con huesos. Los que están en posición vertical a la entrada pertenecen a las patas de los mamuts. Detrás se distingue un cráneo decorado con dibujos en ocre rojo. Esta vivienda fue la primera de las cuatro de huesos de mamut excavadas en Mezhirich.



2. YACIMIENTOS DE HUESOS DE MAMUT en la llanura central rusa; flanquean el río Dniéper y sus afluentes (*color*). De la quincena de yacimientos donde se han encontrado viviendas de huesos de mamut citaremos los de Mezhirich, Mezin, Dobranichevka y Gontsy. Hace 15.000 años la región era una estepa periglacial donde pastaban rebaños de grandes herbívoros, mamuts y rinocerontes incluidos. Los habitantes de las viviendas de huesos de mamut, que cazaban esos herbívoros, formaban parte de una red comercial que debió extenderse hasta el mar Negro, por el sur, siguiendo la cuenca del Dniéper.



3. MAMUT (*Mammuthus primigenius*). Proveía a los grupos de cazadores paleolíticos de alimento, vestido y albergue. El mamut adulto alcanzaba la talla de un elefante; estaba recubierto por un pelaje marrón rojizo. Las bandas paleolíticas cazaban los mamuts y recolectaban sus huesos en sus viajes entre campamentos estacionales. Esta especie se extinguió, en la llanura central rusa, hace unos 10.000 años.

La vegetación que cubría la llanura de la estepa periglacial la componían en su mayor parte arbustos y hierbas. Había pocos árboles, concentrados principalmente en los valles de los ríos. Los finos granos del loess se depositaron durante los períodos estadiales.

En las etapas interestadiales, más cálidas, la región se transformaba en pradera esteparia. Proliferaba la vegetación arbórea; las coníferas se mezclaban con otras especies caducas más fértiles, como el roble. Si bien la deposición de suelo era casi nula durante los períodos fríos estadiales, en los interestadiales llegaba a acumularse un ligero depósito. Por otra parte, durante las épocas interestadiales la erosión creó terrazas y plataformas cerca de los ríos, originándose un sistema de profundos barrancos. Los promontorios que quedaban entre cañones ofrecían a los cazadores ciertas ventajas: constituían buenos puntos de observación, les protegían de los depredadores y se hallaban cerca del agua. En esos promontorios los grupos paleolíticos instalaron sus campamentos.

Los promontorios se levantan hoy hasta 30 metros por encima de la llanura de aluvión que dominan. En la época de la ocupación, sin embargo, apenas si alcanzaban los 15 metros los más altos. El trabajo paleográfico efectuado por Maksim Veklich, del Instituto de Geología de Kiev, Andrei Velichko, del Instituto de Geografía de Moscú, y Leonid Voznyachuk, del Instituto de Geología de Minsk, muestra que los restos de los asentamientos de los cazadores-recolectores se encuentran en capas de loess depositadas hace menos de 18.000 años.

La datación por carbono radiactivo de huesos pelados y quemados procedentes de esos yacimientos ha confirmado que los asentamientos estaban ocupados hacia el final del Paleolítico. Por ejemplo, esa técnica de datación da, para muestras de Mezhirich, una antigüedad de 14.000 a 18.000, situándose la mayoría entre los 14.000 y 15.000 años antes de la actualidad.

La excavación sistemática practicada a lo largo de las últimas tres décadas ha revelado un modelo de organización espacial en esos asentamientos de finales del Paleolítico. Las áreas ocupadas son bastante grandes; algunas cubren más de 10.000 metros cuadrados. Sin embargo, el estrato cultural en que se han encontrado los artefactos humanos es bastante delgado: de cinco a 20 centímetros de profundidad. En cada yacimiento hay de tres a seis viviendas

construidas con huesos de mamut. Miden éstas entre cuatro y siete metros de diámetro, delimitando superficies de unos ocho a 24 metros cuadrados de suelo.

No se distingue ningún modelo peculiar en la disposición de las construcciones; tan pronto forman una línea, como en un yacimiento próximo a la ciudad de Mezin, como un círculo imperfecto (así el de Dobranichevka) y hasta los hay en ordenación rectangular.

Dentro de muchas de las viviendas de huesos de mamut aparecen restos de hogares; se utilizaban los huesos como combustible. También hay áreas de trabajo, donde se fabricaban útiles de hueso y piedra. En el espacio que quedaba entre las viviendas se distinguen pozos de almacenamiento, hogares exteriores y zonas de trabajo. Al igual que sus correspondientes interiores, los hogares exteriores contienen huesos de mamut quemados.

Mezhirich, donde hemos centrado nuestro trabajo, contiene no menos de cinco estructuras de huesos de mamut. Cuatro de ellas se excavaron entre 1966 y 1977; la quinta sigue cubierta. Como en otros lugares, todas ellas presentan un basamento mural formado por grandes huesos de mamut. No se arremolinaban al azar, sin orden; antes bien, se aprovechaba su geometría como un elemento de diseño.

Los cráneos se colocaban a intervalos regulares, dibujando un arco o un círculo completo que formaba el fundamento del basamento interno. Podían seguirse varios métodos a la hora de incluir los cráneos en el muro. En Mezhirich y Dobranichevka se disponían con el rostro (la porción del cráneo donde se insertan los colmillos) hacia abajo. En Mezin, por el contrario, quedaba abajo la región occipital (la parte posterior de la cabeza). En ambas posturas, la parte frontal, plana, miraba hacia el interior. El muro interno se rellenaba en ocasiones con pelvis y escápulas.

El muro de fundamento se extendía hacia arriba y hacia el exterior siguiendo una ordenación arquitectónico-anatómica de los huesos muy curiosa. En Mezhirich no hay dos viviendas excavadas que muestren el mismo modelo. En la número 1, circular, la parte superior del muro se levantó, a lo que parece, con sólo mandíbulas: las 95 encontradas se colocaron sobre los cráneos formando una espiga, con el mentón hacia abajo.

En la vivienda n.° 2, la porción superior del muro se levantó principalmente con huesos largos, fémures y tibias, alineados en vertical. La vivienda n.° 3 es una amalgama de huesos: su estructura carece de la claridad de las otras, lo que sugiere un abandono del lugar antes de su finalización.



4. VIVIENDA NUMERO 4 de Mezhirich, que imita el modelo que siguen las restantes e introduce variaciones en sus diseños. En los otros habitáculos, los constructores levantaron el basamento mural empleando un solo tipo de hueso. En la 4, en cambio, cada segmento del muro presenta un tipo distinto. El inferior derecho consta de mandíbulas; cerca de él se encuentra parte de una columna vertebral. Huesos largos, cráneos y escápulas son el material de los otros segmentos del muro (*no visibles*). La porción con mandíbulas representa una variación en el diseño de la vivienda número 1, pues en ésta todas están con el mentón hacia abajo, mientras que, en la 4, dos columnas lo tienen abajo y, en otra adyacente, miran arriba.

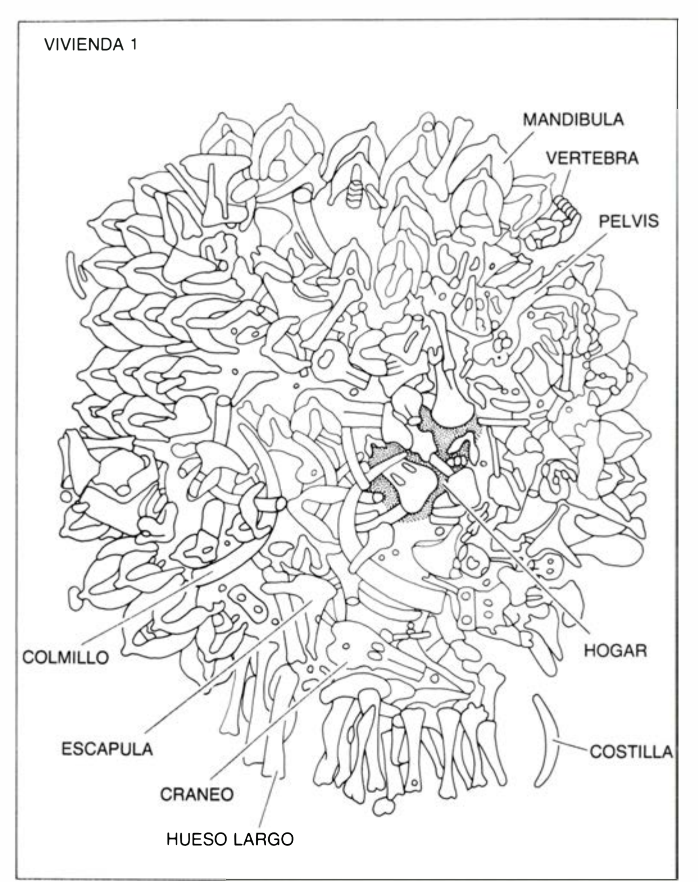
La número 4, todavía en proceso de excavación, presenta el diseño más intrigante. Como en otras estructuras de huesos de mamut, su muro-base adquiere una forma casi circular; pero, y ahí se distingue de los demás fundamentos, no contiene un único tipo de hueso: el material de construcción difiere en distintas partes del muro. La porción que mira al suroeste se hizo con mandíbulas colocadas en espiga, como en la vivienda n.° 1, mientras que otro segmento se levantó con huesos largos, como en la n.° 2.

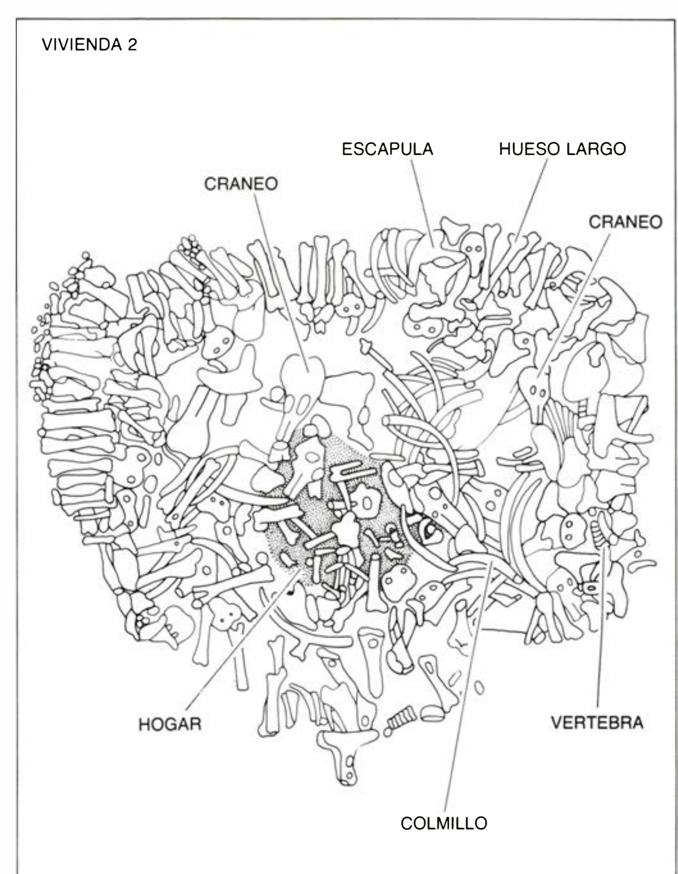
La variedad estética de la vivienda n.° 4 de Mezhirich no se limita a la pura repetición de los planos de las restantes. Se han alterado ligeramente los modelos de las otras estructuras; mientras que en la n.° 1 todas las mandíbulas tienen el mentón hacia abajo, en la 4 la reiteración constructiva toma un nuevo giro: la matriz de filas y columnas de mandíbulas contempla dos columnas con la barbilla hacia abajo junto a una tercera con el mentón hacia arriba.

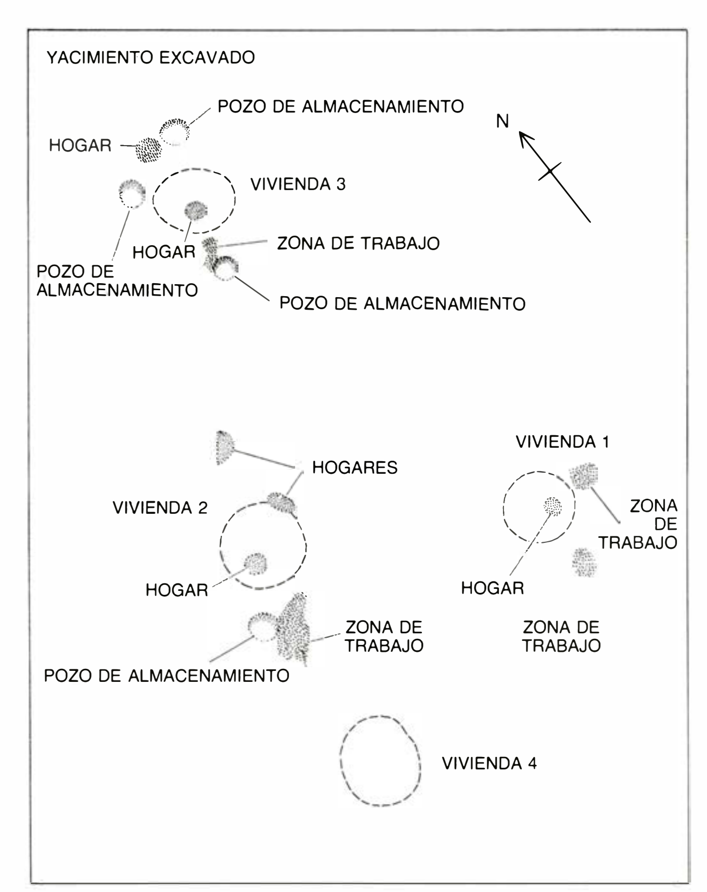
En el modelo se aprecian también elementos de repetición y simetría. En un segmento del muro aparece un cráneo flanqueado por secuencias idénticas de dos escápulas y una pelvis, en simetría especular. El muro se rellenó con piezas de la columna vertebral que muestran también un diseño periódico.

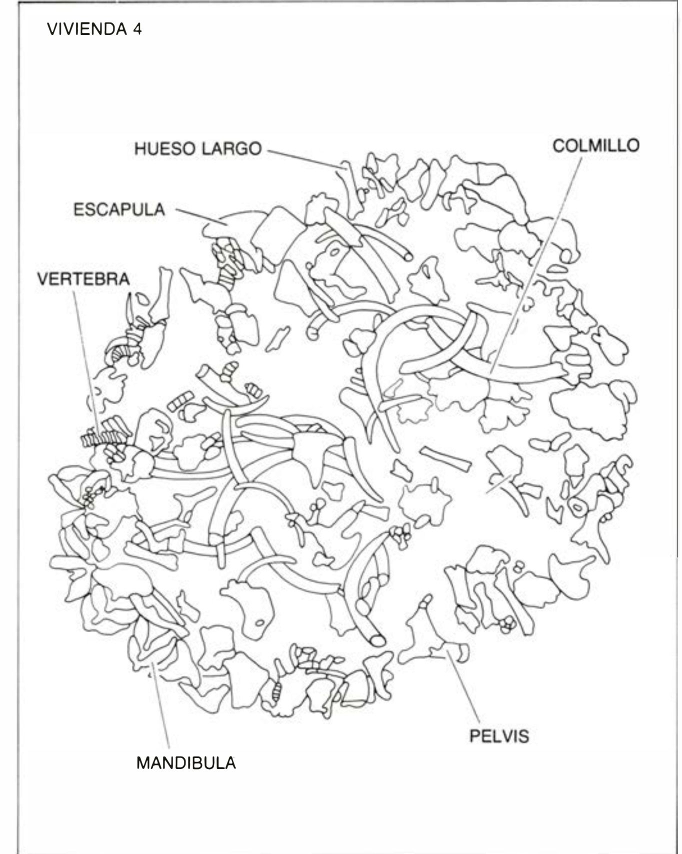
La disposición de los restos de huesos de mamut en Mezhirich nos permite visualizar cómo sería el muro fundacional de las viviendas. Más difícil resulta aventurar el diseño de la fábrica. La porción superior de la estructura debió apoyarse en postes, pero, desgraciadamente, se han descubierto pocos agujeros; no está clara, por tanto, su disposición.

Sí se ha encontrado, en cambio, un grupo de huesos con agujeros practicados por el hombre; quizá sirvieran de





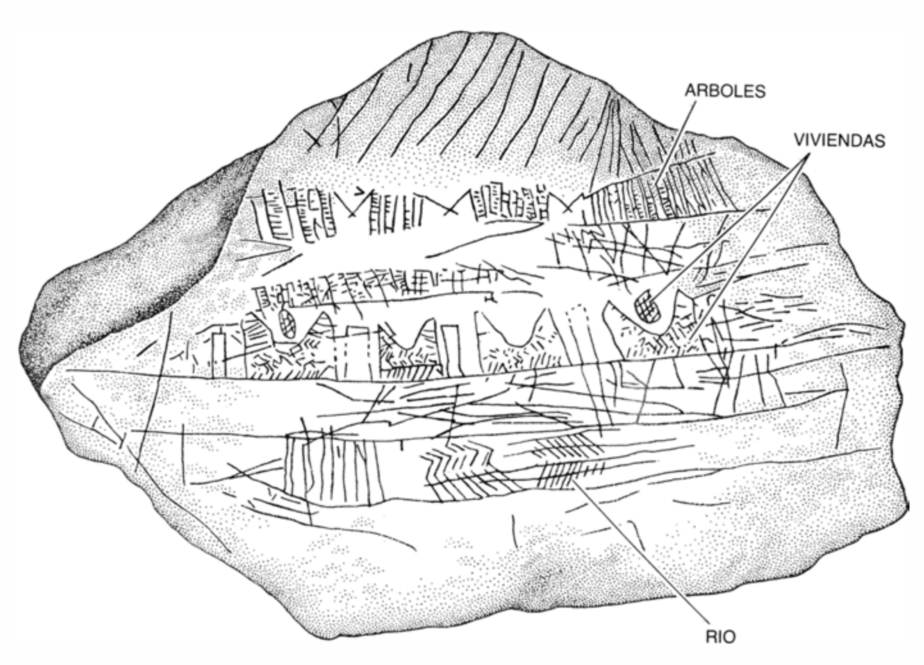




5. PLANTA DEL ASENTAMIENTO DE MEZHIRICH (*abajo, a la izquierda*). Muestra la localización de las cuatro viviendas de huesos de mamut excavadas hasta ahora. Según datos obtenidos, quedaría una quinta por desenterrar. En el espacio que resta entre las construcciones había áreas de trabajo donde se fabricaban útiles; hogares donde se empleaban huesos como combustible y pozos de almacenamiento de huesos y alimentos. Los recuadros superiores y el inferior derecho muestran las excavaciones de las viviendas n.^{os} 1, 2 y 4, las que presentan la planta arquitectónica más desarrollada.

puntos de apoyo de los elementos verticales. A partir de esas y otras informaciones, Pidoplichko, descubridor de Mezhirich y autoridad en todo lo referente a las viviendas de huesos de mamut, concluyó que se trataba de construcciones en cúpula recubiertas con pieles de mamut, sostenidas éstas con más huesos y colmillos.

Las viviendas comparten ciertas características estructurales, si bien varía bastante su forma, lo elaborado de sus plantas y el número de huesos empleados en ellas. El habitáculo n.º 1 de Mezhirich cuenta con unos 21.000 kilogramos de huesos, el n.º 2 con unos 19.000 y, el n.º 4, con unos 15.000. En varias de las estructuras de Dobranichevka y Mezin, por el contrario, no hay más que 1000 kilogramos de huesos.



6. TALLA DE MARFIL DE MAMUT encontrada en Mezhirich. Podría tratarse del primer mapa conocido. Uno de los autores (Kornietz) la interpreta como un mapa de la comunidad paleolítica de Mezhirich; reconoce árboles, viviendas de huesos de mamut y un río, el Ros' o el Rosava (ambos se unen en el lugar que ocupa hoy el pueblo de Mezhirich, nombre que, en ucraniano, significa "entre dos ríos"). Los paleogeógrafos no han podido determinar cuál quedaba más próximo al asentamiento en el Paleolítico.

De ello se infiere que la inversión de trabajo debió ser mucho mayor en las construcciones de Mezhirich que en las de algunos otros yacimientos. Calculamos que 10 hombres tardarían al menos 5,6 días en levantar la número 1, 5,2 en construir la número 2 y 4,3, en la 4. Las viviendas de Mezin y Dobranichevka, más pequeñas, probablemente no requirieron más de medio día de trabajo cada una. Pero estas estimaciones no tienen en cuenta la gran complejidad de la arquitectura de Mezhirich, que indudablemente aumentaría más aún la diferencia de trabajo requerido en cada caso.

La evidente complejidad de las construcciones de Mezhirich, así como la gran cantidad de trabajo necesario para levantar las viviendas, apuntan la práctica de algo fuera de lo común en el yacimiento. Quizás esa construcción formara parte de una ceremonia, aunque se ignora de qué tipo de rito pudiera tratarse.

Mezhirich aparte, sólo se conoce este detalle en otro lugar: el llamado Yudinovo, hoy objeto de excavación. Si los yacimientos estudiados en el pasado incluían complicados diseños arquitectónicos, pasaron desapercibidos, quizá por la limitación de las técnicas arqueológicas.

La canalización del excedente de trabajo sugerida por las viviendas de Mezhirich es un hecho destacable en una comunidad prehistórica; volveremos a ello. Antes convendrá exponer lo que se sabe de la economía de los cazadores paleolíticos, así como describir las viviendas y los artefactos recuperados en el lugar.

Los constructores de las viviendas de huesos de mamut no eran nómadas. Los asentamientos del tipo de Mezhirich se ocupaban durante muchos años. En esa misma región se construyeron por aquella época asentamientos sin las viviendas de huesos de mamut. Parece probable que las bandas de cazadores alternasen entre ambos tipos de campamentos según una pauta estacional. Los que tienen estructuras de huesos de mamut se utilizarían probablemente durante los nueve meses de la estación fría, mientras que los otros servirían durante la época de calor de asentamientos temporales y talleres de elaboración de útiles de piedra.

Al trasladarse los cazadores paleolíticos de sus viviendas de invierno a las de verano, sus actividades económicas se centrarían en la búsqueda y aprovisionamiento de grandes mamíferos. El hábitat de la estepa periglacial, sin equivalente en la actualidad, sostenía grandes manadas de herbívoros gregarios. Además de los mamuts lanudos había rinocerontes, renos, caballos, bisontes, bueyes almizclados y animales más pequeños (liebres y otros).

Los grandes mamíferos que proveían a los cazadores locales de la mayor porción de sus calorías se complementaban con peces y aves. Los yacimientos paleolíticos conservan restos de salmones, carpas, lucios, patos, gansos, cisnes, y lagópodos árticos. También se han hallado lobos y zorros árticos, si bien el estado de sus esqueletos indica que esas especies se cazaban por su piel, no por la carne.

Los habitantes paleolíticos de la estepa eran cazadores, no cabe duda; pero también la recolección debió desempeñar un destacado papel en su economía. En algunos yacimientos se han recuperado huesos de muchos mamuts: 93 en Gontsy, 116 en Mezin y 149 en Mezhirich. Es muy variable el grado de conservación de los distintos esqueletos. De hecho, la variación es tanta que cabe considerar que algunos de los huesos se recogieron de esqueletos de animales muertos hacía ya tiempo. Si era importante la fracción de huesos recogidos de animales no cazados, quizás a los mamuts correspondiera un papel menos significativo como fuente de alimento de lo que el número de sus huesos parece sugerir.

La carne cobrada en la caza, y quizás también los huesos recolectados, se colocaban en pozos cercanos a las viviendas. Esos agujeros medían metro y medio de profundidad, lo suficiente para penetrar el estrato de deshielo de la capa permanentemente helada y ofrecer una protección duradera de la carne.

Los utensilios de piedra tuvieron un papel decisivo en el tratamiento de la carne y en la construcción de las viviendas de huesos de mamuts. Entre los tipos encontrados en Mezhirich y otros lugares del Paleolítico superior de la planicie rusa hay raspadores para el tratado de las pieles, buriles para la talla de material duro, como asta o

marfil, percusores para conformar puntas de arpones y punzones de piedra para la preparación preliminar de la carne.

Se otorga ese lugar de honor a los instrumentos de piedra en la cultura del Paleolítico superior, entre otras razones porque se utilizaron para fabricar artefactos de otros materiales; por ejemplo, del hueso y marfil se sacaban objetos cotidianos, como martillos, azadas, perforadores, leznas, pulidores y agujas (¡con sus ojos!)

Los miembros de la comunidad fabricaron también objetos ornamentales de hueso y marfil. Entre las obras artísticas de Mezhirich y Mezin se cuentan varios huesos de mamut decorados con dibujos en ocre rojo. Los habitantes hacían piezas decorativas para su uso personal y embellecimiento de sus viviendas. De Mezin y Mezhirich proceden collares de conchas, perlas de ámbar y hueso y dientes de lobos y zorros árticos perforados para su empleo como colgantes. El arte de la comunidad había avanzado de la decoración a la representación: los objetos encontrados en estos dos asentamientos contienen también estilizadas figuritas.

Importa destacar que el material de algunos de los objetos artísticos procede de zonas muy alejadas del yacimiento de donde se recuperaron. Conchas fósiles halladas en Mezin pertenecían a depósitos marinos distantes de 600 a 800 kilómetros del lugar. El ámbar utilizado para fabricar perlas en Mezhirich es de depósitos cercanos a Kiev, a unos 150 kilómetros de distancia. La presencia de materiales llegados desde muy lejos apoya la hipótesis de un intercambio fluido entre los grupos de cazadores y recolectores. Tal red se extendería desde Mezhirich hasta el mar Negro, en el sur, y a una considerable distancia por el oeste.

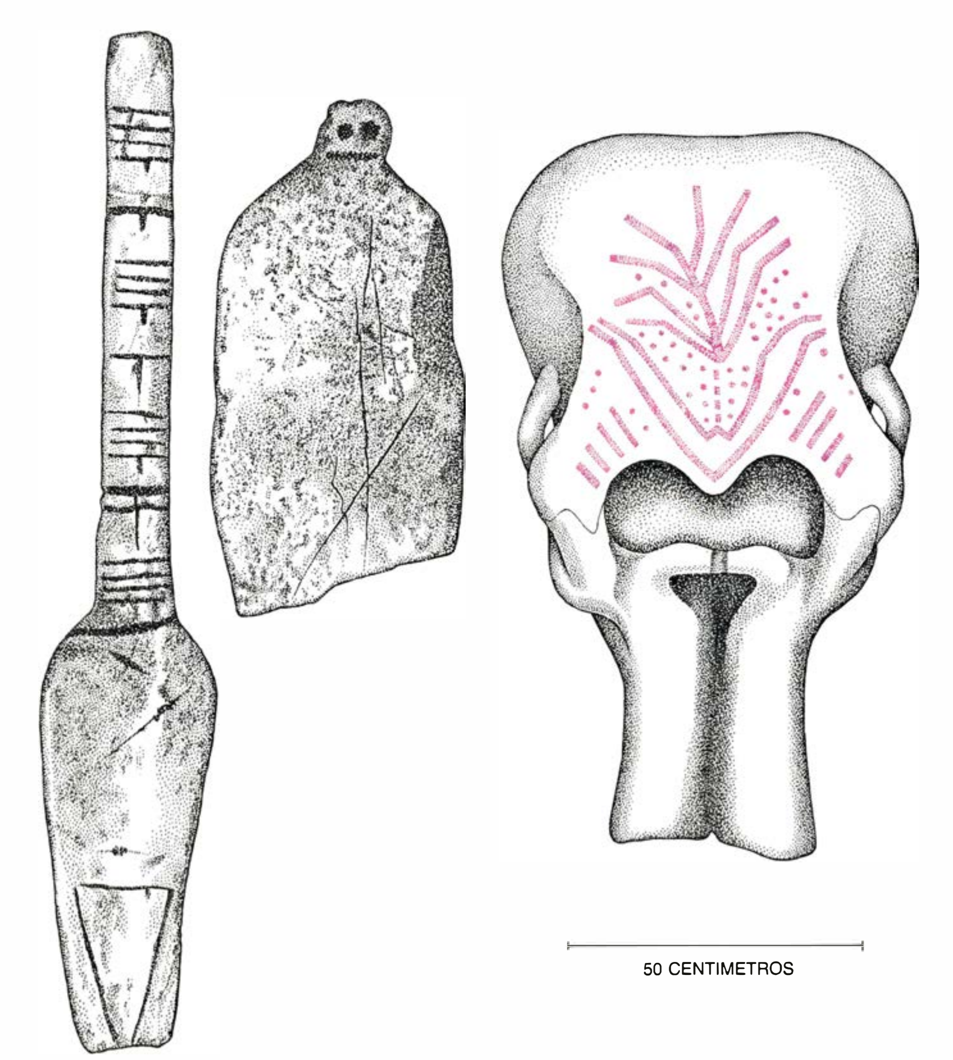
Los hallazgos presentados nos ofrecen el cuadro siguiente: grupos que se trasladan estacionalmente entre campamentos fijos, cazan grandes mamíferos para su alimento y vestido y recogen huesos para sus útiles y refugios. Las medidas del espacio ocupado en Mezhirich apuntan que la comunidad la componían no menos de 50 miembros.

¿Qué tipo de sistema social tenían ese medio centenar de personas? Aunque no resulta fácil reconstruir el sistema de creencias o la estructura social de un pueblo desaparecido, algo cabe deducir de los documentos físicos recuperados. La ocupación de campamentos permanentes implica que disponían de algún mecanismo para resolver las disputas surgidas dentro del asentamiento. En los grupos nómadas, los conflictos se resuelven por división: a los discrepantes siempre les cabe tomar direcciones distintas. Pero en una comunidad que ha invertido mucho en el almacenamiento de alimentos y en la construcción de viviendas tienen que existir, por fuerza, instituciones capaces de guardar la paz.

No conocemos de qué tipo eran esas instituciones, pero es probable que guardaran relación con la aparición de diferencias dentro del status social. En algunos yacimientos se aprecia una desigual distribución de los pozos de almacenamiento, lo que nos lleva a suponer que algunas viviendas podían beneficiarse más que otras de los sobrantes. Un incipiente rango jerárquico quizá sirviera también para canalizar el trabajo necesario en la construcción de las viviendas de huesos de mamut.

Suele admitirse que la división de la sociedad en grupos con un status desigual no se dio antes del Paleolítico superior, precisamente cuando se levantaron las viviendas de huesos de mamut. Las excavaciones de Mezhirich y otros lugares de la planicie rusa pueden, por tanto, constituir una ventana hacia una fase decisiva de la historia social: el período de aparición de las clases sociales. Semejante conclusión, no obstante, pertenece al mundo de las hipótesis.

En definitiva, la labor desarrollada en Mezhirich y en otros asentamientos nos dice bastante de los constructores de las viviendas de huesos de mamut. Eran importantes consumidores en un entorno rico. La llanura rusa fue una zona privilegiada del mundo paleolítico, una región donde las complejas adaptaciones de cazador y recolector habían logrado un alto grado de evolución y donde quizá se alcanzase un nuevo nivel de desarrollo social.



7. OBJETOS DE ARTE encontrados en Mezhirich. Nos sugieren una comunidad relativamente importante, con un nivel alto de desarrollo cultural. El objeto de la izquierda es una figurita femenina estilizada; el del centro probablemente represente una figura humana. Ambos se muestran aquí a tamaño natural. El cráneo de mamut de la derecha se ha dibujado con ocre rojo; se recuperó en la vivienda número 1. Es el que aparece en la parte superior de la figura 1, detrás de la fila de huesos que forman la entrada.

Experimentos sobre estructuras góticas

Los constructores góticos utilizaron las propias catedrales como modelos, modificando los diseños a medida que surgían problemas estructurales. Un análisis de los arbotantes demuestra que la información se propagó rápidamente

Robert Mark y William W. Clark

La catedral de Notre Dame de París, cuya construcción se inició entre 1150 y 1155, fue proyectada para ser la de mayor altura de la arquitectura gótica. Sus bóvedas se elevan casi 33 metros sobre el pavimento, superando en más de ocho metros a sus predecesoras de comienzos del gótico. El aumento de la altura en más de un tercio, con respecto a edificios anteriores, fue el mayor que se produjo en toda la época. Sin embargo, la configuración estructural de la cabecera de París (el extremo oriental de la catedral donde tienen lugar las celebraciones litúrgicas), que fue el primer sector en construirse, era básicamente idéntico al de las iglesias anteriores y de menores proporciones. El empuje hacia fuera de las bóvedas contra el alto muro con ventanas del clerestorio es contrarrestado únicamente por unos arcos de piedra ocultos bajo el inclinado tejado de la tribuna adyacente.

En el diseño de la nave, que es algo más ancha, sin embargo, y debido a su mayor altura y su estructura más diáfana, los constructores parisienses decidieron que los arcos ocultos eran insuficientes para soportar tan alto clerestorio. El incremento de la anchura significaba que el empuje de las bóvedas era mayor que el que se producía en la cabecera. Pero había algo más importante. En la edificación de la cabecera los maestros tuvieron que estar atentos a un nuevo problema para el que sus actuaciones en otras iglesias de menor altura no los había preparado: la velocidad del viento es sustancialmente mayor a mayor altura. La presión del viento, como es sabido, es proporcional al cuadrado de la velocidad del mismo, por lo que su repercusión es mucho mayor en los edificios altos. Creemos que fue el empuje del viento lo que llevó a los constructores de la nave de la catedral de París a introducir los arbotantes poco antes de 1180. Aunque su estructura es similar a la de los arcos ocultos, los arbotantes son exteriores y soportan el muro a mayor altura.

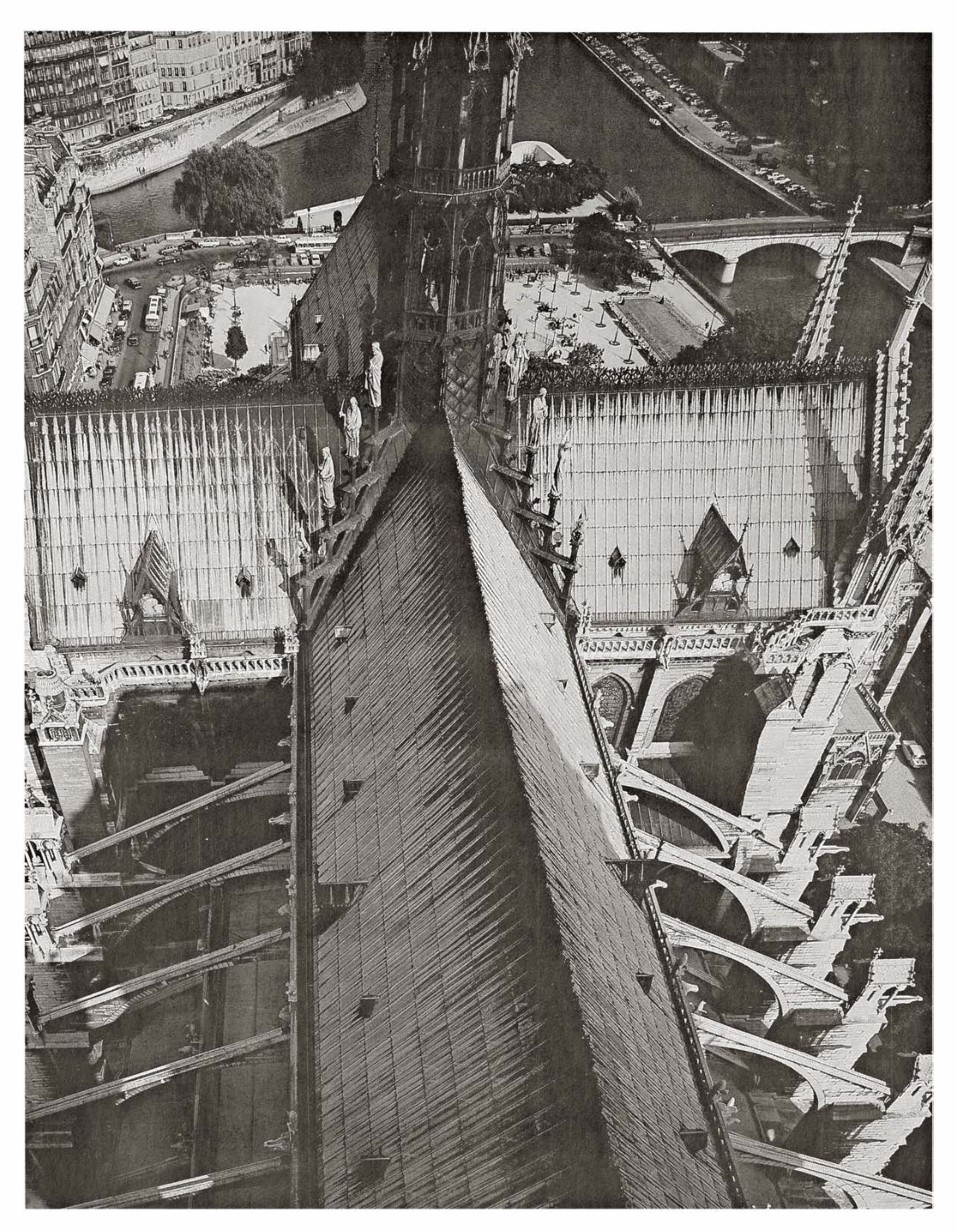
En menos de dos décadas los arbotantes se convirtieron en el distintivo estilístico de los edificios góticos. El origen y difusión del desarrollo de tal tecnología durante la Edad Media ha interesado desde hace mucho tiempo a los historiadores. Nuestros propios análisis estructurales de numerosos edificios medievales han revelado que sus diseñadores aprendían experimentando, de la misma manera que los ingenieros de hoy en día confían en prototipos para averiguar el comportamiento estructural de un diseño. La observación de roturas por fragilidad, producidas en el mortero fresco, por ejemplo, condujo a frecuentes modificaciones estructurales que fueron, sin duda, una importante fuente de innovaciones en el diseño.

Más aún, la experiencia obtenida en un centro constructivo fue transmitida a otros proyectos, de tal forma que el edificio más antiguo actuó casi como un modelo aproximado para confirmar la estabilidad del nuevo diseño. Nuestro análisis de Notre Dame y de su influencia arquitectónica demuestra la existencia de una comunicación fácil entre los centros constructores medievales y de una rápida transmisión de las innovaciones tecnológicas, en especial de los arbotantes. Los maestros canteros de catedrales más tardías, como las de Chartres y Bourges, parecen haber sido conscientes de los fallos del esquema inicial de arbotantes de París, al modificar, de acuerdo con ello, sus propios diseños.

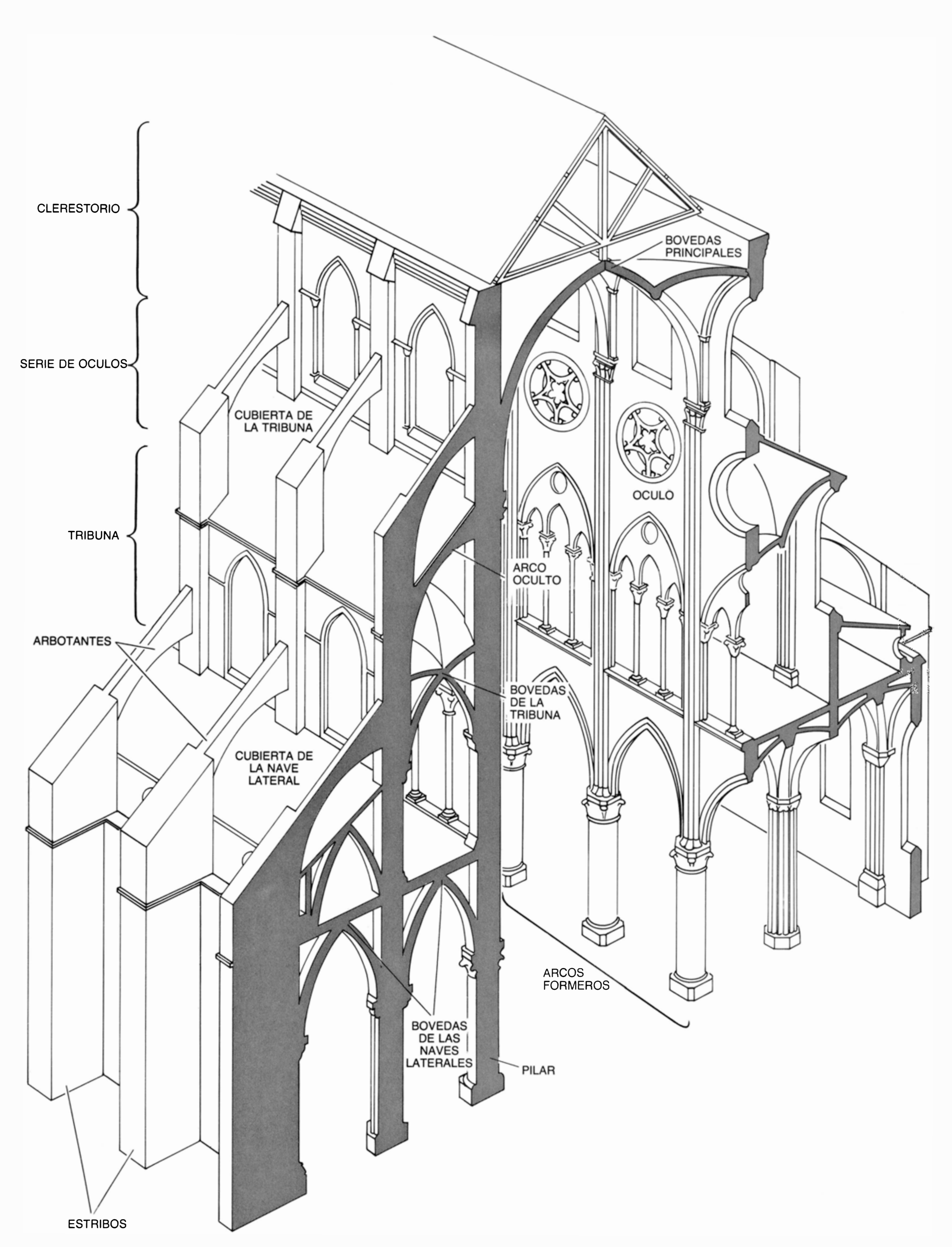
El período gótico coincidió con los avances de fines del medievo en la manufactura de paños y con la expansión del comercio que produjo una gran riqueza y condujo al engrandecimiento de las ciudades. El nuevo enriquecimiento alentó una prodigiosa actividad constructiva que cambió el aspecto de la Europa occidental. En el norte de Francia el éxito del estilo gótico puede apreciarse en un sinfín de pueblos y ciudades.

Desgraciadamente, son escasos los testimonios escritos anteriores al siglo XIII para documentar el trabajo de los constructores góticos y para descubrir el sistema de comunicación existente entre ellos. La mayor parte de los textos que han sobrevivido no son más que observaciones marginales efectuadas por no especialistas, generalmente el patrono del edificio. El ejemplo tradicional es la inspirada descripción del Abad Suger, por desgracia incompleta, de la nueva construcción que encargó hacia 1130 para la iglesia abacial de Saint Denis, cerca de París, primer ejemplo del estilo gótico. Otro documento excepcional es la crónica que año tras año efectuó el monje Gervasio sobre la reconstrucción de la catedral de Canterbury desde 1174 a 1184. Sin embargo, ninguno de estos textos menciona avance tecnológico alguno, ni indica que las ideas fuesen transmitidas de un centro constructivo a otro. No se han conservado dibujos arquitectónicos del siglo XII, si es que en realidad existieron. El documento más antiguo del uso de dibujos para registrar y transmitir ideas arquitectónicas se fecha en torno a 1225, casi en el momento en que la actividad constructiva del gótico empezaba a declinar.

Ante la carencia de documentos sobre la tecnología constructiva de la



1. NOTRE DAME DE PARIS. Esta catedral, cuya construcción comenzó entre 1150 y 1155, fue el más alto edificio gótico del siglo XII. El primer sistema de arbotantes de la historia soportaba su amplia nave. La catedral fue reconstruida en profundidad por dos veces, en los siglos XIII y XIX. Los arbotantes actuales, contemplados en esta imagen desde una de las torres occidentales, son muy diferentes de los primitivos del siglo XII. Un arco embebido en el muro del estribo perpendicular al crucero sur (*a la derecha en la fotografía superior*), sugiere la disposición de los arbotantes primitivos (*figura 3*).

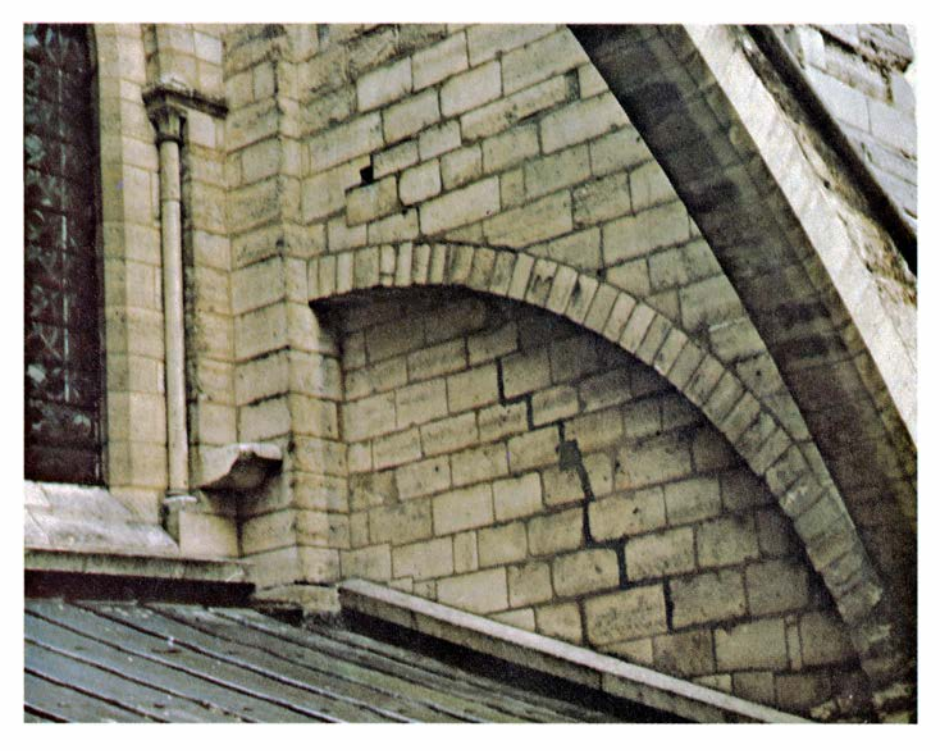


2. SECCION de la catedral de Notre Dame. Muestra la elevación del interior de la nave original (antes de la campaña de intervenciones del siglo XIII), según la reconstrucción efectuada por los autores sobre la base de análisis arqueológicos y estructurales. Los arbotantes superiores trasladan al exterior los empujes producidos por el viento sobre la tribuna situada al nivel de los arbotantes, los cuales remiten estos empujes a los estribos. A la izquierda de la nave principal la sección transversal (*en gris*) procede a través de los arbotantes y los pilares; a la derecha de la nave se hace a la mitad de un tramo.

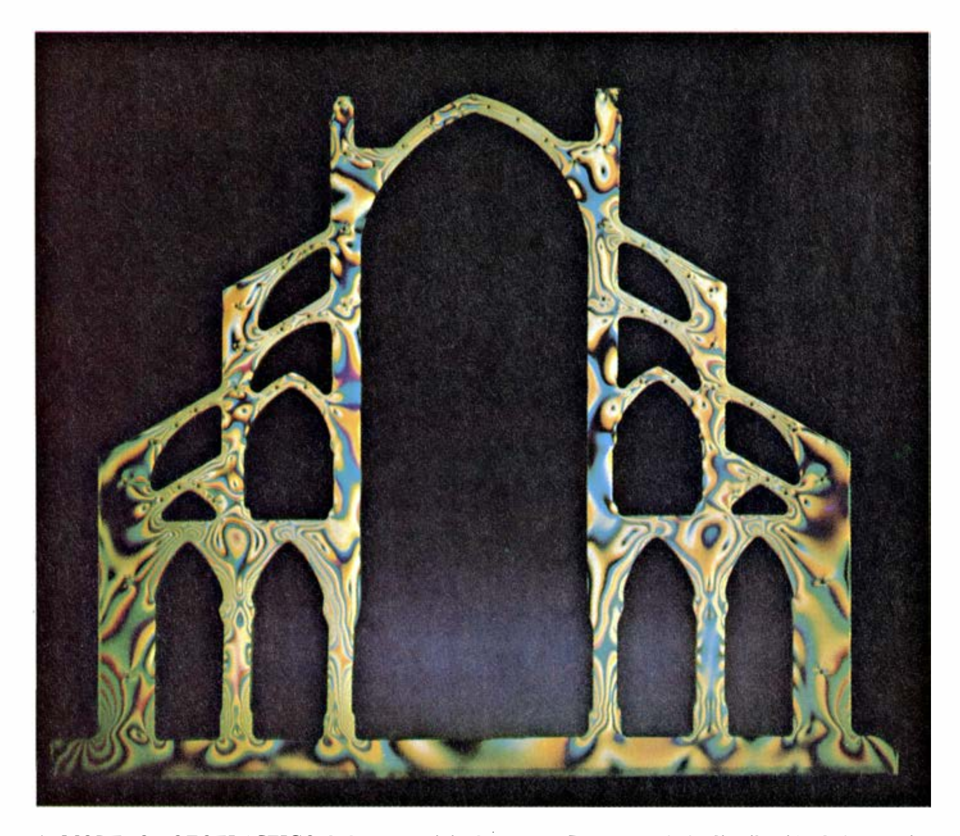
época gótica es preciso recurrir al estudio de los propios edificios. Una manera de hacerlo es a través de la arquitectura. Atendiendo a los más sutiles cambios en la estructura y ornamentación de una parte a otra de la catedral, determinaremos el orden en que las diferentes secciones fueron construidas, sirviendo frecuentemente para identificar las principales fases de la construcción. En algunas ocasiones las fases de la construcción pueden fijarse casi año por año, como el arquitecto australiano John James ha hecho en la catedral de Chartres. Por medio del sistemático estudio arquitectónico de una serie de edificios seremos capaces de seguir el trabajo individual de los maestros cuando se trasladaban de un centro a otro, llevando consigo información sobre nuevos desarrollos de la construcción. Las huellas artísticas de estos artesanos se rastrean a través de su manejo de detalles estructurales y decorativos.

Un segundo procedimiento para estudiar las iglesias góticas se basa en los modernos instrumentos que el análisis estructural utiliza para entender cómo funcionan en realidad los edificios. Una de esas técnicas que hemos empleado en profundidad se denomina modelado fotoelástico. Un modelo en plástico transparente de la sección transversal de una catedral se calienta a unos 150 grados Celsius, temperatura a la que el plástico se torna gomoso y es fácilmente deformable cuando se aplican unos pesos que simulan la fuerza de la gravedad y del viento sobre el edificio. Las deformaciones se detienen cuando el modelo es enfriado, produciéndose un paradigma de interferencia si se contempla a través de filtros de polarización cruzados. El patrón de interferencia puede interpretarse como un gráfico de contorno de las tensiones y, de este modo, revelar posibles errores de diseño en el edificio.

El estudio de Notre Dame de París por estos dos procedimientos nos ha permitido una nueva reconstrucción de la nave original y de los primeros arbotantes. Todo el sistema de botareles fue ampliamente rehecho a principios de la segunda década del siglo XIII, realizándose, asimismo, a mediados del XIX intensas restauraciones. Los restos arqueológicos ponen de manifiesto que el sistema original de arbotantes era mucho más simple de lo que se pensaba con anterioridad. Este lo formaban dos series independientes de arbotantes: una superior, sobre la cubierta de la tribuna y unida al muro del clerestorio, y



3. MURO DEL ESTRIBO del siglo XII, situado sobre la tribuna en el crucero sur; presenta embebido en su cara interna un arco, que probablemente repite el arco de círculo de los arbotantes superiores originales, que soportaban el adyacente clerestorio de la nave. Este testimonio arqueológico sugiere que los primitivos arbotantes sostenían el clerestorio en un punto situado casi a la mitad de las ventanas originales, bastante por debajo de la cubierta. En el siglo XIII los arbotantes superiores se sustituyeron por otros gigantescos que abarcaban las naves laterales, mientras las ventanas del clerestorio se ampliaron.



4. MODELO FOTOELASTICO de la nave original de Notre Dame; revela la distribución de las presiones determinadas por la simulación del empuje del viento y muestra que fueron razones estructurales las que llevaron a reconstruir los arbotantes. El modelo en plástico transparente está contemplado con ayuda de filtros polarizadores. El patrón de interferencia resultante es un gráfico de contorno de la intensidad de las presiones, en el que cada color corresponde a diferentes niveles de empujes. Las zonas críticas se corresponden con las de trama más compacta. Se descubrieron importantes tensiones en donde los arbotantes apoyan el clerestorio y la tribuna. Las fracturas del mortero en estas zonas necesitaron frecuentes reparaciones hasta que la construcción de los nuevos arbotantes, en el XIII, eliminó el problema.

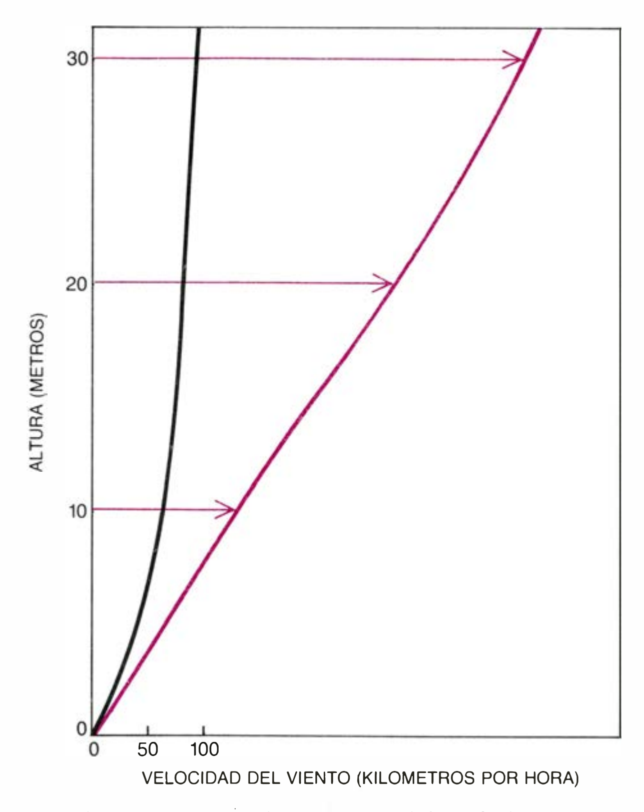
otra inferior, para fortalecer el muro exterior de la tribuna y para aumentar la resistencia contra los empujes hacia fuera de los arbotantes superiores.

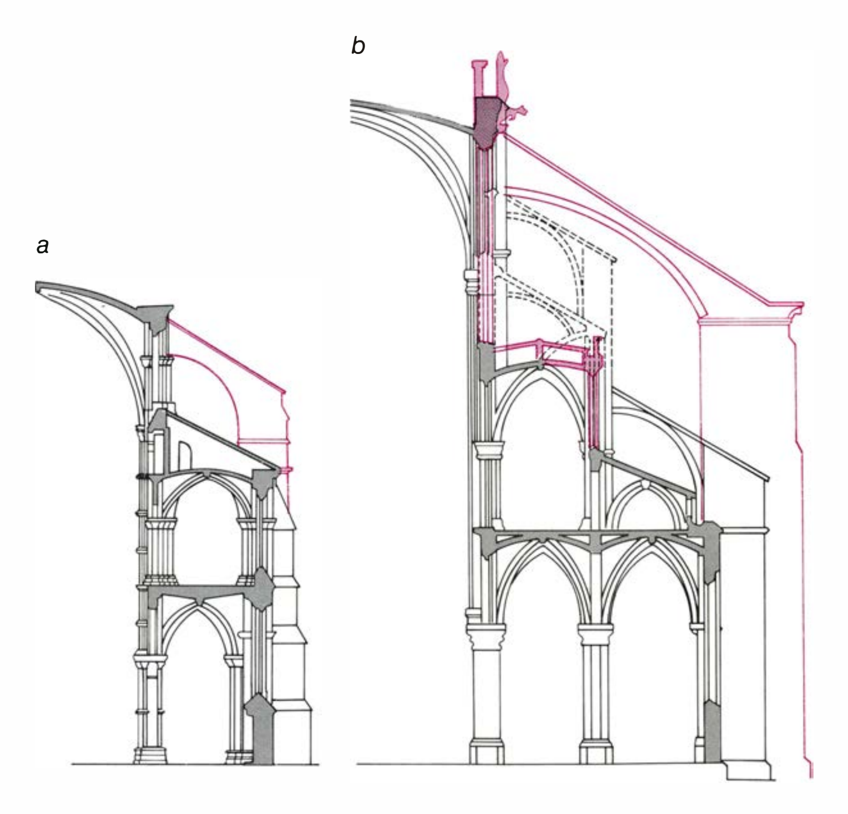
La prueba más evidente de la existencia de este sistema es el arco que subsiste en la cara interna del muro del contrafuerte en el brazo sur del crucero [*véase la figura 3*]. Aunque está embebido en la pared y nunca fue un auténtico arbotante, su curvatura viene casi a ser un reflejo de los botareles que soportaban el clerestorio de la nave adyacente. Esto significa que los primitivos arbotantes superiores debían unirse al muro principal casi a media altura del punto en que se abrían los ventanales originales. La serie inferior de arbotantes subsistió más o menos intacta hasta las restauraciones del siglo XIX y su aspecto puede restituirse mediante dibujos y antiguas fotografías realizadas antes de esa campaña de reconstrucciones. Otros muchos detalles arquitectónicos pueden deducirse gracias a la iglesia contemporánea de Saint Martin de Champeaux, perteneciente al obispo de París y cuyos arbotantes se considera un reflejo del primitivo esquema de botareles de la catedral de París.

A principios de la segunda década del siglo XIII este sistema sufrió un cambio drástico: el orden superior de arbotantes fue sustituido por otro gigante que abarcaba las dos naves laterales. (El orden primitivo sólo se extendía sobre la primera nave lateral, desde el clerestorio al muro de la tribuna.) ¿Qué obligó a este cambio en el diseño?

Los primeros investigadores del tema supusieron que el cambio formaba parte de su esfuerzo tendente a dotar de mayor luminosidad a la catedral. Los constructores de París no parecen haber estado preparados para la disminución (comparándola con los edificios anteriores) de la cantidad de luz que llegaba al suelo del templo, efecto que se debía a la considerable mayor altura de los muros. El problema se hizo, sin embargo, más patente en la cabecera, debido a que en la posterior edificación de la nave los constructores elevaron la altura de las bóvedas de la tribuna y agrandaron los ventanales de la misma.

Según una teoría, estos cambios no fueron suficientes para evitar la oscuridad de la iglesia, lo que condujo de manera inmediata a que a principios del siglo XIII se decidiera aumentar el tamaño de los ventanales del clerestorio hasta su formato actual. Para bajar la base de las ventanas fue necesario bajar la cubierta y el muro exterior de la tribuna. A consecuencia de ello los constructores tuvieron que modificar los arbotantes, porque eran parte estructural del muro de la tribuna. En otras palabras, según esta teoría, los cambios en la estructura fueron única-





5. DESARROLLO DE LOS ARBOTANTES GOTICOS: refleja el reconocimiento de problemas estructurales asociados a los botareles originales de Notre Dame. La evolución se indica por una serie de secciones transversales de edificios, dibujados a una misma escala, y por un gráfico de velocidad del viento. Los añadidos al diseño primitivo de cada edificio están señalados en color; los elementos eliminados, mediante punteado. El máximo de la velocidad del viento (*curva en negro*) aumenta con la elevación y la presión del viento, que es proporcional al cuadrado de la velocidad (*curva de color*), aumenta drásticamente. Debido a su gran altura, Notre Dame (*b*) estuvo expuesta a fuerzas de vientos superiores a los que soportaron las iglesias góticas precedentes. La necesidad de fortalecer el muro de la nave contra los vientos, al tiempo que se dejaba entrar luz en la iglesia, sugirió el uso de los primeros

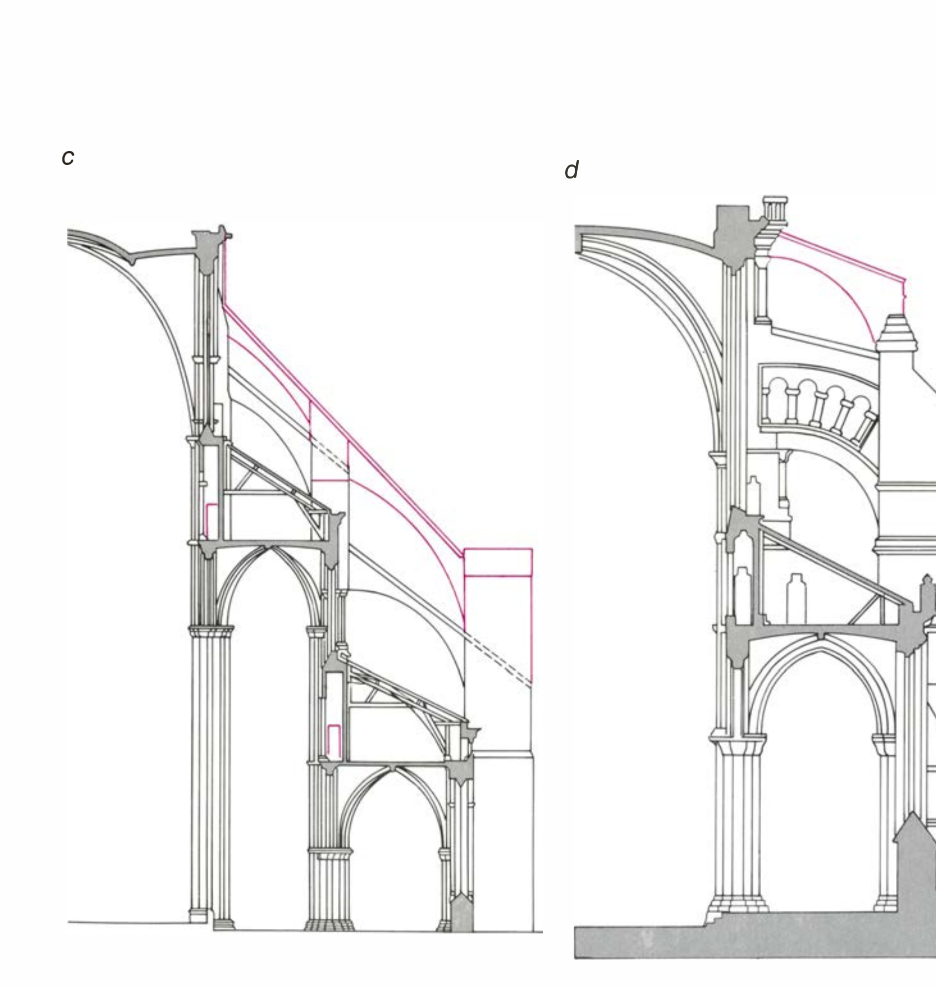
mente una consecuencia de la necesidad de alterar el esquema de las ventanas.

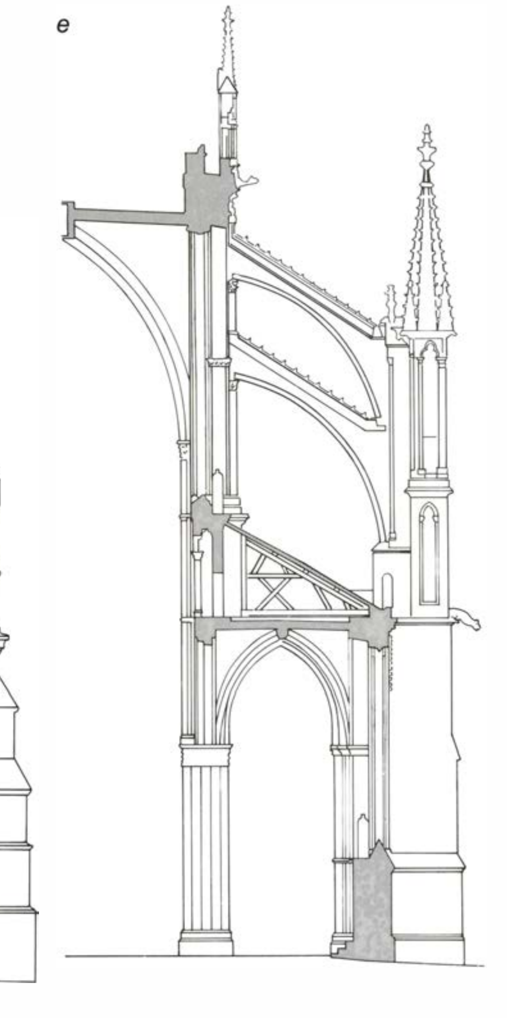
Nuestro análisis estructural indica, sin embargo, que la reconstrucción del primer orden de arbotantes puede haber sido, en realidad, una respuesta a los problemas estructurales inherentes al primitivo diseño. El modelo fotoelástico, realizado inicialmente para confirmar la validez técnica de la nueva reconstrucción arqueológica, reveló la existencia de niveles críticos de tensiones, no previstas, en dos puntos del trazado de los arbotantes enfrentados al viento: en donde el orden superior se une al clerestorio y en donde el orden inferior se une a la tribuna. Especialmente durante las fuertes tempestades, que los modernos registros meteorológicos sugieren que debió sufrir París de manera periódica durante los 40 o 50 años de vida de los arbotantes primitivos, la presión ejercida por el viento en estas zonas superaría en tres o en cinco veces la resistencia del mortero medieval. Debido a que el origen de las presiones estaba localizado a gran altura, es dudoso que hubieran surgido problemas fundamentales en la fábrica. Sin embargo, las grietas habrían sido visibles con facilidad y las reparaciones, incluyendo las correspondientes a las junturas dañadas, habrían tenido que ser efectuadas con prontitud después de cada tormenta de importancia para prevenir el deterioro general.

Este mantenimiento regular presentaría, no obstante, dificultades debido a que las zonas afectadas eran bastante inaccesibles. Esto indica que fue más que una simple coincidencia que el esfuerzo de reconstrucción del siglo XIII eliminara estas zonas de tensiones localizadas. El punto de apoyo de los nuevos arbotantes gigantes con el clerestorio era considerablemente más alto, lo que también reducía notablemente el empuje en los arbotantes situados a nivel de la tribuna.

Al efectuar estos cruciales cambios en la estructura, los constructores aprovecharían la oportunidad para tratar de incrementar el grado de luminosidad de la iglesia mediante el alargamiento de las ventanas. Mientras que los problemas estructurales del diseño primitivo fueron resueltos de manera efectiva, los beneficios derivados del alargamiento de las ventanas resultaron más bien escasos. Cualquiera que haya visitado Notre Dame en París recordará que sigue siendo un edificio oscuro.

Antes incluso de que Notre Dame fuese reconstruida, las experiencias que de ella se obtuvieron se utilizaron en otros centros constructores. La cabecera de la catedral de Bourges, construida entre 1195 y 1214, es una estructura simple, ligera y, sin embargo, sólida. Su elevación es única. En lugar





arbotantes en torno a 1180. Estos se reconstruyeron a principios de la década de 1220. El nuevo esquema también permitió a los constructores bajar la cubierta de la tribuna y ampliar las ventanas del clerestorio. Los arbotantes fueron posteriormente añadidos a la catedral de Laon (*a*), construida por las mismas fechas que Notre Dame, aun cuando es mucho más pequeña y probablemente no los necesitaba. El diseño primitivo de la cabecera de Bourges (*c*), concluido en 1214, y el de la nave de Chartres (*d*), finalizado en 1221, fueron modificados después de las fracturas advertidas en París. En ambos edificios los arbotantes superiores se añadieron para reforzar los altos muros contra el empuje del viento. En la nave de Reims (*e*) los arbotantes superiores se situaron para resistir el empuje del viento sobre el clerestorio y la cubierta; los inferiores contrarrestaban el empuje hacia fuera de las bóvedas.

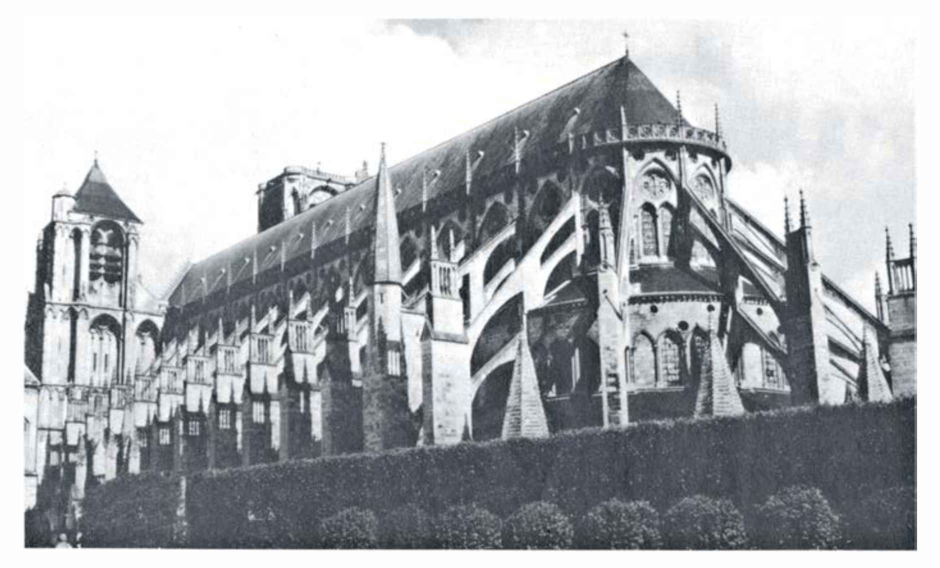
de lograr mayor altura –36 metros desde el pavimento a las claves–, mediante el alargamiento del clerestorio, los constructores elevaron considerablemente las naves laterales interiores. La sección transversal resultante es más triangular que la correspondiente a los clásicos edificios del primer gótico, tales como las de Chartres y Reims, y su base ancha y estable hace que los muros sean menos sensibles a las deformaciones laterales. Más aún, el sistema de arbotantes es anormalmente eficaz. Dada la gran inclinación de los botareles, éstos transmiten los empujes laterales de las bóvedas y del viento hasta los cimientos más directamente, lo que permite que todo el sistema de soportes pueda ser aligerado. El modelo ha señalado que, a pesar de su extrema ligereza, las presiones máximas en la cabecera de Bourges son sólo de 1/2 a 2/3 inferiores a las que se encuentran en otras catedrales góticas mayores. En las zonas críticas donde las tensiones tienden a desarrollarse, tales como los extremos de los arbotantes, la cabecera de Bourges rebasa a cualquier otro gran edificio gótico de los que hemos analizado.

¿Cómo es posible que en este primer período del desarrollo de los arbotantes góticos el maestro de Bourges lograse un diseño tan eficaz? Se relaciona a menudo Bourges con Notre Dame de París por sus cinco naves y la similitud de su planta. Robert Branner, autor de la única monografía moderna sobre su seo (*La Cathédral de Bourges et sa place dans l'architecture gothique*, Ediciones Tardy, 1962), creía que el desconocido maestro no se había formado en París, sino en el noreste, en el valle del río Aisne. Comparando la sección transversal de la catedral con nuestra reconstrucción de la nave original de París, se advierte, sin embargo, una notable similitud en las proporciones espaciales. Estas semejanzas sugieren que el diseño de Bourges puede proceder de París (y a su vez ayuda a corroborar nuestra reconstrucción de Notre Dame).

La evidencia de que el punto de arranque de los arbotantes de Bourges procede directamente de París es aún mayor. Tras sus análisis arqueológicos Branner afirma que el diseño original de Bourges exigía un solo orden de arbotantes para soportar el clerestorio de la cabecera, más que el doble orden actual. Nuestra investigación señala que esto es así también en los arbotantes de la nave. La fila superior de arbotantes hoy visible no debió formar parte del plan original; y los grandes estribos a los que aquéllos transmiten los empujes debieron ser, por consiguiente, más cortos. Cuando este esquema se compara con nuestra reconstrucción de la nave de París, se puede apreciar que los sistemas de arbotantes guardan entre sí una estrecha semejanza.

En un determinado momento de la construcción, el diseño de Bourges se sustituyó por el hoy existente. La fecha exacta de esta decisión es desconocida, pero probablemente se tomó entre 1208 y 1214. Para entonces la mayor parte de la nave de París llevaba construida casi dos décadas, y es lógico suponer que se hubieran detectado en el mortero las fracturas producidas por el inadecuado reforzamiento contra el viento. La decisión de construir en París un nuevo orden de arbotantes soportando el clerestorio a un nivel más alto debió adoptarse probablemente en la segunda década del siglo XIII. La bifurcación del orden principal de arbotantes de Bourges y la elevación del punto de apoyo del orden superior de este con el clerestorio, así como la incorporación de un segundo orden de arbotantes en las naves, podrían entenderse como medidas de precaución adoptadas por un maestro cantero que había oído referir los problemas surgidos en París. Luego resultó que el empuje de los estribos de los arbotantes del clerestorio fue singularmente moderado. El modelo fotoelástico ha demostrado que la zona de apoyo es la única en toda la catedral donde las presiones críticas tienden a desarrollarse y que unos soportes más bajos habrían empeorado este problema.

Los empinados y eficaces arbotantes de Bourges parecen ser el resultado de una mayor conciencia, basada en la experiencia de París, sobre los efectos del viento en los edificios elevados. A pesar de su economía y de su evidente éxito técnico, no fueron adoptados en otras iglesias del alto gótico. Quizá los arbotantes de Bourges se vieron en su época como demasiado ligeros y atrevidos o tal vez se los consideró como una "chapuza" técnica, indigna de la "gran" arquitectura. Por cualquier razón, el principal medio de difusión del desarrollo de los arbotantes góticos fue, sin embargo, la catedral de Chartres.



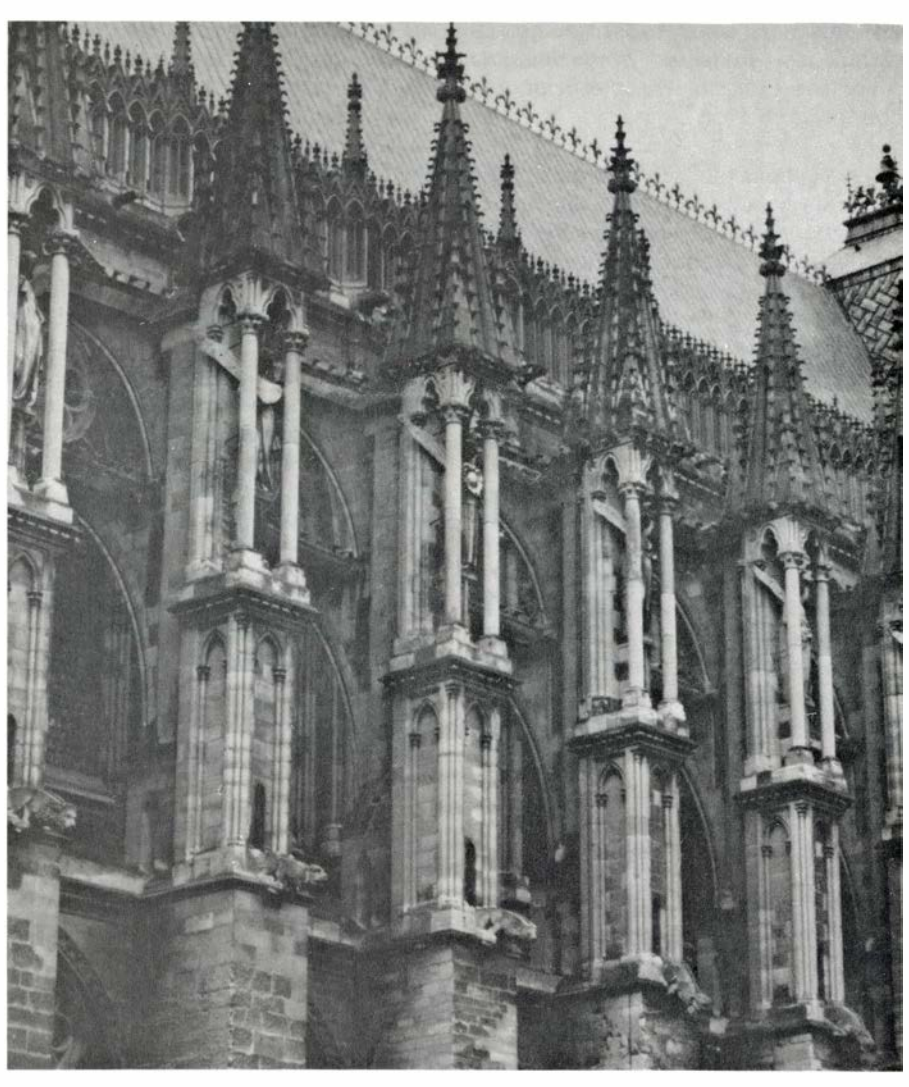
6. SISTEMA DE ARBOTANTES de la catedral de Bourges. Es notable por su economía, particularmente en la cabecera (*en primer término*). Por ser tan inclinados, los arbotantes conducen las fuerzas del viento y de las bóvedas directamente y pueden ser más ligeros que otros arbotantes del primer gótico.

Iniciada casi a la vez que Bourges, Chartres fue construida con mayor rapidez. Estaba prácticamente concluida en 1221. La principal novedad de diseño de Chartres fue la gran ampliación de las ventanas del clerestorio. Estas llegan más abajo del punto en que las bóvedas principales arrancan de los pilares. Este logro se ha interpretado habitualmente como derivado de la comprensión del potencial pleno de los botareles, pero desde el punto de vista técnico el sistema de arbotantes de la nave de Chartres es relativamente pesado e incluso un poco torpe, puesto que incluye el equivalente a tres arbotantes separados, así como una innecesaria ménsula bajo la cubierta de la nave y perpendicular al muro principal.

Los arbotantes más altos son especialmente notables. Arrancan de manera extraña de la parte superior de los estribos y cruzan la saliente cornisa en la parte superior del muro de la nave.

Es indudable que no forman parte del diseño primitivo, pero ¿cuándo y por qué se añadieron? Se pensó durante mucho tiempo que respondían al *Informe* de 1316 elaborado por un grupo de expertos parisienses que recomendaba a los mantenedores de la catedral "atención a los arbotantes". Sin embargo, una reinterpretación actual del documento indica que esta vaga expresión se refiere únicamente a la necesidad de reparar los arbotantes existentes. Aún más, el modelo de la nave de Chartres, tanto con el orden superior de arbotantes como sin él, les demostró que no era del todo eficaz a la hora de reducir las tensiones puntuales originadas por vientos fuertes. Por ello, es improbable que su misión fuera la de servir como corrección a un fallo de diseño detectado por los expertos de París.

Por el contrario, el orden superior de arbotantes de Chartres fue probablemente añadido al finalizar la primera fase de la construcción. Nuevos datos arqueológicos reunidos por John James fijaron la fecha de la misma en torno a 1221. Es razonable considerar que el constructor de Chartres, como su homólogo en Bourges, añadiera una nueva serie de arbotantes como precaución contra los posibles efectos de los fuertes vientos sobre su estructura. El probable origen de la misma, tanto por parte del constructor como por parte de sus clientes que debían pagar esta obra adicional, estuvo en la experiencia adquirida en París a comienzos del XIII.



7. PINACULOS sobre los estribos de Reims: están huecos y acanalados, mientras sus compañeros decorativos de la fachada occidental son macizos. La combinación del peso de cada pináculo y de la estatua del nicho que le corresponde es casi igual al peso de la piedra extraída del estribo para crear el nicho. El maestro constructor sabía que el peso de los pináculos debilitaba la estabilidad de los estribos.

Aunque el orden superior de arbotantes de Chartres no era totalmente efectivo, sí parece que marcó el camino a seguir en la ubicación de los botareles en las últimas catedrales del primer gótico. En estos edificios la serie inferior de arbotantes está destinada a soportar los empujes hacia afuera de las bóvedas de la nave, mientras que la serie más alta refuerza el alto muro del clerestorio y el pronunciado tejado de madera contra el empuje del viento. El ejemplo tradicional de este diseño lo aporta la monumental catedral de Reims, comenzada en torno a 1210. El sistema de contrafuertes de Reims es más refinado que el de Chartres: la innecesaria ménsula bajo la cubierta de la nave extrema fue eliminada, así como el tercer orden de arbotantes. A pesar de ello, Reims es incluso conservadora en comparación con las estructuras más altas iniciadas con posterioridad, durante el mismo siglo; tal es el caso de las enormes catedrales de Amiens (1220), Beauvais (1225) y Colonia (1248).

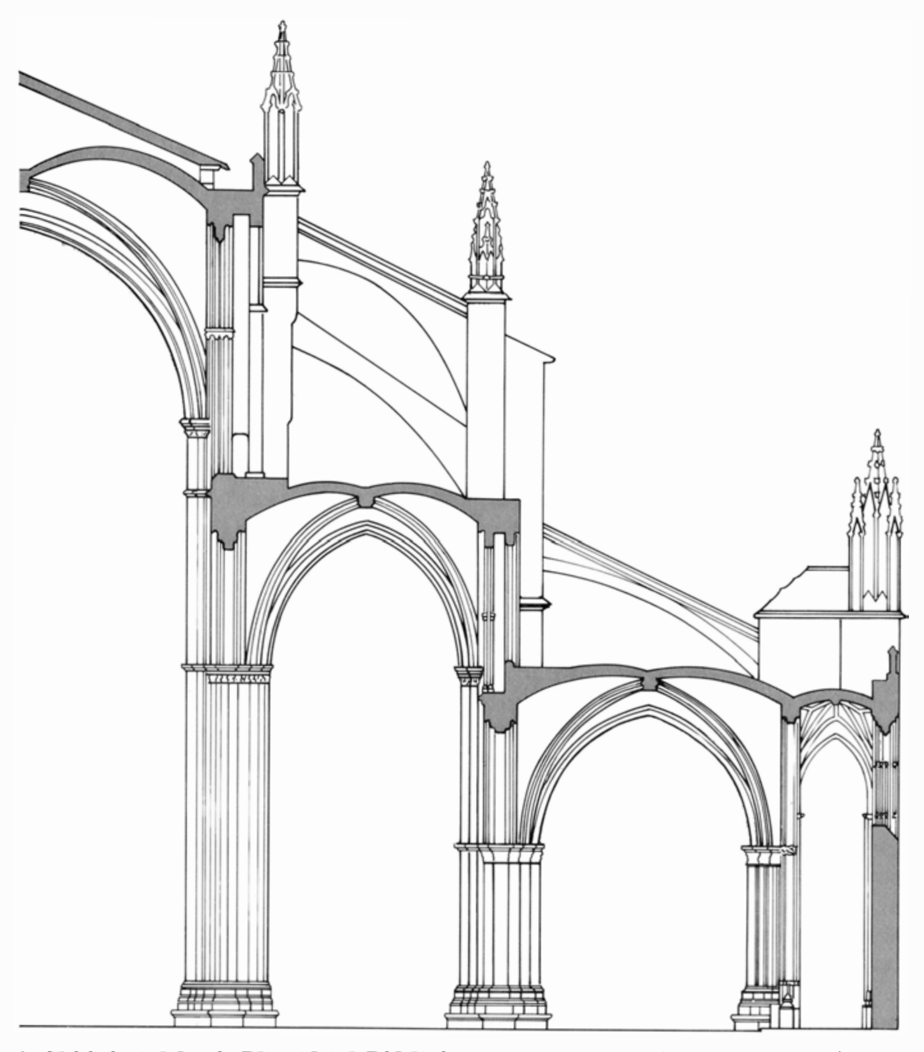
Las medidas de precaución que se tomaron en Reims, así como en Chartres, bien pudieran atribuirse a la influencia de Notre Dame de París. En Reims este influjo se dejó sentir hasta en los más mínimos detalles. Por ejemplo, al diseño de los pináculos que coronan los estribos, dándole un fuerte impacto visual al exterior de la catedral. Habitualmente los pináculos colocados próximos al extremo de los arbotantes incrementan el alabeo originado por el empuje hacia afuera de los arcos y de este modo disminuyen la estabilidad de los estribos. Debido a que los pináculos son relativamente ligeros en comparación con el enorme peso de los arbotantes, el efecto es pequeño y en la mayoría de las iglesias fue ignorado. Por el contrario, en Reims el constructor parece haber tenido especial cuidado en disminuir el efecto producido por la carga de los pináculos. La aguja central de cada pináculo está ahuecada y acanalada; combinado con el de la estatua del nicho inferior, el peso del pináculo se estima en 52 toneladas, es decir, alrededor de dos toneladas menos del peso estimado para la piedra extraída del estribo al formar el nicho. De esta manera el pináculo no afecta a la estabilidad total del estribo.

Tan complejo equilibrio de masas parece trascender la capacidad de un constructor precientífico. Sin embargo, en las zonas de la catedral en donde los pináculos cumplen una función más decorativa que estructural, como a lo largo de la fachada occidental, son macizos y más pesados que sus compañeros situados sobre los estribos. Esto apoya nuestro punto de vista acerca de que el vaciado de los pináculos situados sobre los estribos es un hecho premeditado por parte del constructor, preocupado por la estabilidad del sistema de

arbotantes. El conservadurismo estructural, intencionado, probablemente fuese una respuesta a los problemas encontrados en París.

Las cautelas que se tomaron tras las experiencias de Notre Dame parecen haber tenido una influencia generalizada en la arquitectura gótica de principios del siglo XIII, advirtiéndose incluso en muchas iglesias de proporciones más reducidas. Un ejemplo de ello es la catedral de Laon, cuya construcción estaba bastante avanzada para cuando los arbotantes se inventaron. No hay razones para creer que fueran necesarios los botareles en Laon, cuya altura interior es sólo de 24 metros; sin embargo, fueron incorporados, casi inmeditamente después de que aparecieran en París, a un esquema estructural que, por lo demás, quedó inalterado. Un ejemplo aún más claro corresponde a la iglesia abacial de Saint Germain des Prés, de París. Los arbotantes se añadieron a la cabecera ya casi completa, aun cuando sus bóvedas apenas si alcanzan los 14 metros, altura inferior a la mitad del tamaño de las de Notre Dame.

La influencia de Notre Dame no se limitó a Francia. Por ejemplo, en España un número considerable de los mayores templos góticos estaban en construcción en la tercera década del siglo XIII, precisamente cuando se producía la renovación de París destinada a resolver el problema de las presiones ejercidas por el viento. El sistema de arbotantes de la catedral de Toledo se parece a nuestras reconstrucciones de los sistemas primitivos de París y Bourges. Sin embargo, en comparación con las catedrales francesas, Toledo es relativamente ancha para su altura (alrededor de 31 metros) y la cubierta tiene poca inclinación, por lo que la fuerza máxima de los vientos contra el clerestorio es relativamente pequeña. No obstante, el clerestorio está reforzado por dos series de arbotantes. La superior, que en las iglesias francesas clásicas se opone al empuje del viento sobre la cubierta, parece tener sólo un papel visual en la catedral de Toledo. Su presencia probablemente fuese una respuesta a la experiencia de París.



8. SECCION DE LA CATEDRAL DE TOLEDO, donde se muestra que los arbotantes superiores son innecesarios. Se desplegaron tras las observaciones efectuadas, antes de que se comenzase la construcción de la seo toledana en torno a 1227, de las fracturas provocadas por el viento en Notre Dame.

La modificación de toda una serie de catedrales góticas a partir de la observación de los defectos estructurales detectados en un edificio anterior tiene un paralelo en el presente, que también implicó nuevas experiencias sobre construcciones ligeras a gran escala. Cuando en julio de 1940 se inauguró el tramo central de 854 metros del puente colgante de Tacoma Narrows, fue el tercero más largo del mundo. Por otra parte, su peso por metro de calzada era, con mucho, en ese momento, el más ligero de los que presentaban un tramo central tan largo. El puente de Tacoma Narrows fue el compendio de la tendencia de principios del siglo XX hacia calzadas más ligeras y torres esbeltas. El grado de endurecimiento de su calzada, por medio de abrazaderas metálicas, fue sólo de 1/350 con respecto a la longitud del tramo.

Cuatro meses después de la inauguración un viento matinal prácticamente constante de 18 metros por segundo provocó importantes oscilaciones en el tramo central; a mediodía se hundió estrepitosamente. La única víctima directa fue un perro abandonado en un automóvil, pero indirectamente sufrió las consecuencias la "estética de la delgadez" de los puentes colgantes en América. Muchos de los tramos centrales de los puentes colgantes construidos durante el período comprendido entre las dos guerras mundiales, incluyendo el Puente de Bronx-Whitestone de Nueva York y el Golden Gate de San Francisco, fueron rápidamente reforzados, generalmente mediante la adición de pesados entramados en la calzada. La generación de puentes construidos después del desastre también incorporó tales entramados.

Por ello, incluso en la era científica, los arquitectos e ingenieros deben sacar experiencia de estructuras completas, especialmente de aquellas que son mayores que los prototipos iniciales. Y si del experimento se obtiene un resultado óptimo, debe ser rápidamente comunicado a otros centros constructores. A partir de nuestros estudios sobre las estructuras góticas precientíficas hemos llegado a la conclusión de que existió una comunicación semejante, aunque un poco más lenta ya en el siglo XII. Con el establecimiento de tal sistema de comunicación el método empírico para el diseño estructural se hizo sorprendentemente efectivo.

Juegos de ordenador

Yin y yang: recurrencia o iteración, la Torre de Hanoi y las argollas chinas

A. K. Dewdney

Los buenos rompecabezas proporcionan excelentes vías de acceso a los dominios del pensamiento abstracto en que moran matemáticos y otros teóricos. Los mejores incorporan en sí temas pertenecientes a tales dominios; temas cuya importancia desborda considerablemente la de los propios rompecabezas.

Dos clásicos rompecabezas, la Torre de Hanoi y los anillos chinos, sugieren dos parejas de temas contrapuestos: recurrencia e iteración, unidad y diversidad. Aparte tales consideraciones "serias", los rompecabezas resultan divertidos y proporcionan al propio tiempo un satisfactorio sentimiento de confusión al neófito, signo distintivo de su lento progreso y penetración en los reinos del pensamiento abstracto.

El rompecabezas de la torre consta de tres varillas verticales fijas a un tablero. Al comenzar, ensartada en una de las varillas, se encuentra una pila de discos de tamaños gradualmente mayores, con el disco de menor diámetro en lo alto. Los discos han de manipularse conformemente a las siguientes reglas sencillas:

1. Los discos han de trasladarse, uno a uno, de una varilla a otra.
2. Ningún disco puede descansar sobre otro de menor tamaño.

Habrá que mover primero el disco más pequeño, pues es el único inicialmente accesible [*véase la figura 1*]. En el turno siguiente hay dos posibles traslados del disco mínimo (carentes ambos de objeto), más una posibilidad de traslación para el disco inmediatamente mayor. Este disco ha de ir a la varilla desocupada, ya que no es lícito superponerlo al disco más pequeño (regla 2). Lo que deba hacerse en el tercer turno no resulta ya obvio: ¿deberá devolverse el segundo disco a la varilla inicial, o deberíamos mover nuevamente el disco pequeño, y en tal caso, a qué varilla?

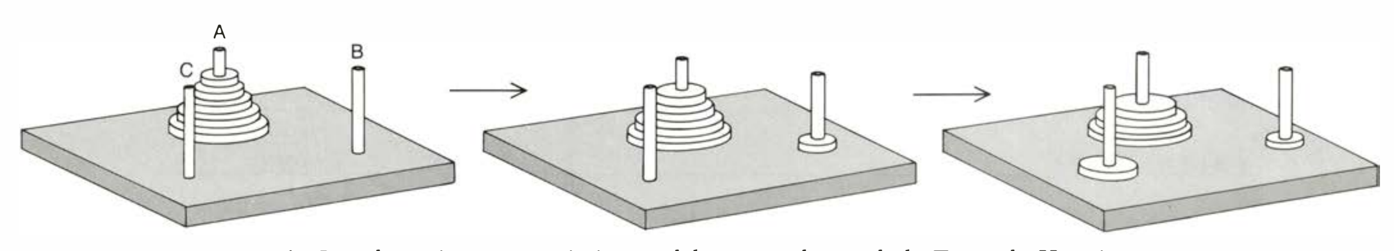
A partir de aquí habremos de vérnoslas con una larga sucesión de jugadas, y dispondremos de amplias posibilidades de elegir mal. Aun si en todos los casos se eligiera correctamente, harían falta $2^n - 1$ jugadas (como veremos pronto) para redisponer, ensartada en torno a otra varilla, una torre de n discos, trasladados de uno en uno. Lo sorprendentemente largo del procedimiento necesario para resolver el rompecabezas, incluso con un número moderadamente pequeño de discos, queda bien ilustrado por el siguiente relato, tomado del clásico libro de W. W. Rouse Ball, *Mathematical Recreations and Essays*:

"En el gran templo de Benarés... bajo el domo que señala el centro del mundo, yace una placa de latón a la que están fijas tres agujas de diamante, de un codo de alta cada una, y tan gruesas como el cuerpo de una abeja. En torno a una de esas agujas, Dios, en el acto de la Creación, colocó sesenta y cuatro discos de oro puro, descansando el mayor sobre la placa de latón, y decreciendo progresivamente los demás conforme se asciende por la pila. Es la Torre de Brahma. Día y noche, sin cesar, los sacerdotes del templo van transfiriendo los discos de una aguja de diamante a otra, de acuerdo con las leyes fijas e inmutables de Brahama, que exigen que el oficiante no deba mover más de un disco por vez, y que deba situar tal disco en otra aguja, sin que queden por debajo de él discos más pequeños. Cuando los sesenta y cuatro discos se hayan transferido de la aguja en que Dios los colocó en la Creación a una de las otras, la torre, el templo y los brahmines quedarán reducidos a polvo y, con inmenso estruendo, el mundo se desvanecerá."

Al no haberse el mundo esfumado todavía, tenemos testimonio de la extremada lentitud de la resolución del rompecabezas: aun si los sacerdotes trasladasen los discos a razón de uno por segundo, ¡harían falta más de 500.000 millones de años para redisponer la torre inicial de 64 discos!

En este punto, el lector puede participar más directamente (sin temor a poner en peligro el universo), haciéndose con cinco naipes, de as a cinco de corazones, pongamos por caso, y delimitando mentalmente tres puntos sobre la mesa. Apilemos los naipes en uno de los tres, en orden, con lo que quedará en lo alto el as. Tratemos ahora de resolver el problema para cinco discos, trasladando las cartas, una a una, de uno a otro punto de la mesa, sin colocar nunca un naipe sobre otro de menos valor. ¿Conseguirá el lector terminar la recolocación antes de que llegue el fin del mundo? Según la fórmula $2^5 - 1$, la transferencia habría de culminarse en 31 movimientos.

¿Cómo resolver un rompecabezas así? ¿Por qué algunas personas los culminan sin dificultad, mientras que otros han de luchar duro con ellos? Mi respuesta a la segunda pregunta sugiere cómo contestar a la primera. Tengo la convicción de que todos nos valemos de formas de pensamiento matemático en casi todos los momentos de nuestra existencia consciente. Tanto nuestras conclusiones acerca de por qué Tío Antonio no vino a la boda, como las de nuestro plan para cargar el equipaje de vacaciones en el baúl del coche, se han deducido lógicamente a partir de ciertas premisas. Tales deducciones pueden ser sumamente elaboradas, hecho que me induce a pensar que casi toda



1. Los dos primeros movimientos del rompecabezas de la Torre de Hanoi

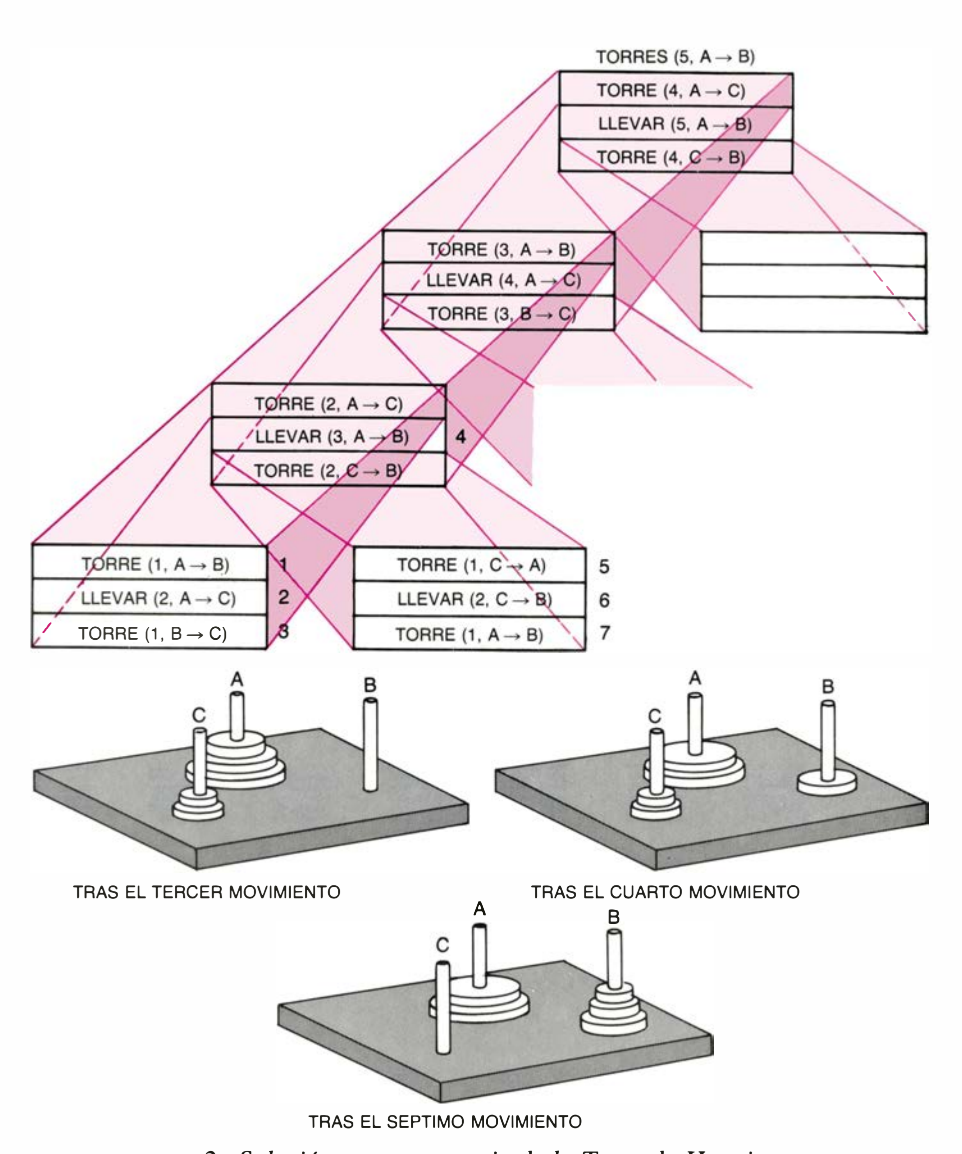
persona capaz de tales proezas intuitivas pudiera llegar a ser muy diestra en el razonamiento analítico. Todo consiste en traer al plano de la atención consciente esas facultades analíticas de carácter intuitivo, a fin de poderlas utilizar de manera formal.

Por ejemplo, después de jugar un rato con la torre de cinco pisos, es casi seguro que se observará de cuando en cuando la aparición de torres más pequeñas. Las de dos discos se presentan abundantemente; las de tres, alguna que otra vez; puede incluso que llegue a observarse una de cuatro. Todo ello puede sucedernos aun cuando no tengamos idea clara de cómo obtener la solución. Lo que hacemos no es más que jugar.

Empero, bastante pronto se nos presenta, para ser conscientemente inspeccionada, una idea clave, a saber: "Si se puede hacer una torre de dos discos, o una de tres (y no digamos ya, una de cuatro), ¿por qué no una torre de cinco pisos? Al detectar ciertas regularidades en la forma en que se van formando esas torres menores nos vemos llevados, más o menos rápidamente, a una pauta de jugadas que acabarán produciendo una torre de cinco discos en alguna de las otras varillas.

Una idea similar se presenta por doquier en matemáticas y en ciencias de cómputo, y que es valiosa como técnica de resolución de problemas. Enunciada como principio general, podría rezar más o menos así: "Si consiguiera resolver el problema en un caso algo más sencillo, tal vez pudiera utilizar esa solución para el caso más complejo". Tal idea es la noción de recurrencia, explícitamente, la inclusión en un procedimiento del propio procedimiento.

La noción de recurrencia, aplicada al caso particular del problema de la torre, queda perfectamente clara: si supiéramos resolver el problema para $n - 1$ discos, seguramente sabríamos resolverlo para n. La indicación clave que nos permite idear una solución para n discos a partir de la obtenida para $n - 1$ nos la proporciona la solución del problema en el caso de sólo dos discos. Imaginémoslo así. El disco de arriba, o primer disco, y el inferior, o segundo disco, deben llevarse a otra varilla. Llamemos a la varilla que actualmente ocupan varilla origen, a la que finalmente ocuparán, varilla destino, y, a la restante, varilla auxiliar. Si llevamos el primer disco a la varilla auxiliar, y el segundo disco a la varilla destino, basta en la tercera jugada trasladar el disco primero a la varilla destino para completar la solución. Esas tres



2. Solución por recurrencia de la Torre de Hanoi

jugadas se convierten en fundamento de una solución por recursión en tres fases, en la cual el primer disco se remplaza mentalmente por toda una torre formada por $n - 1$ discos y, el segundo, pasa a ser el disco n-ésimo (el mayor de todos). Las tres fases pueden expresarse como sigue:

1. Transferencia de la torre de $n - 1$ discos desde la varilla origen hasta la varilla auxiliar.

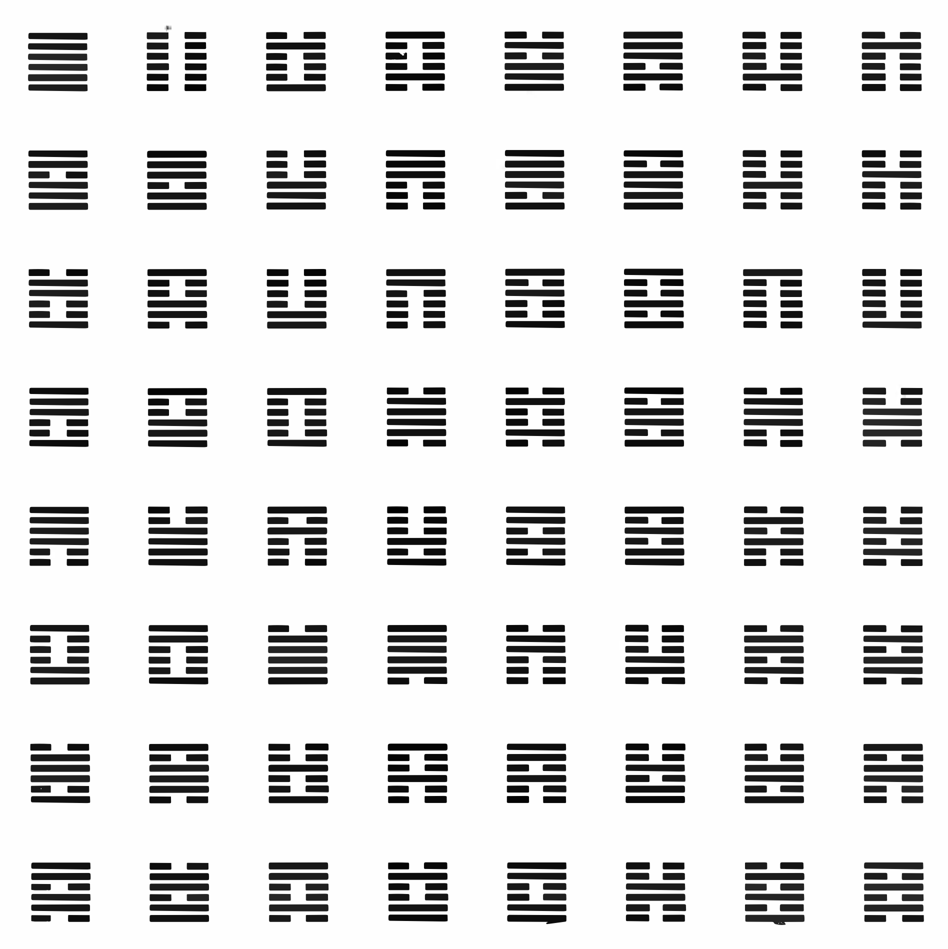
2. Traslado del n-ésimo disco desde la varilla origen hasta la varilla destino.

3. Transferencia, por segunda vez, de la torre de $n - 1$ discos, en esta ocasión, desde la varilla auxiliar hasta la varilla destino.

Esta receta en tres partes se limita a imitar la solución que ya teníamos para el rompecabezas de dos discos. Admitiendo, desde luego, que sepamos resolver el rompecabezas para $n - 1$ discos, podremos valernos de la secuencia de movimientos que lo soluciona para transferir la torre de $n - 1$ discos desde la varilla origen hasta la auxiliar. En la fase siguiente, el disco n-ésimo ha sido liberado de su carga, y podemos trasladarlo hasta la varilla destino. En la tercera fase, volvemos a valernos de la solución conocida para el caso de $n - 1$ discos, a fin de trasladarlos desde la varilla auxiliar hasta la destino.

¿Cómo resolver el rompecabezas cuando la torre esté formada por $n - 1$ discos? La respuesta está mirándonos con insistencia desde el papel. Bastará repetir el procedimiento, pero sustituyendo ahora el término $n - 1$ de las fases primera y tercera por $n - 2$, y así sucesivamente. Acabaremos llegando a un punto en que las fases primera y tercera exijan transferir tan sólo un disco.

Este proceso resolutivo, que va propagándose sin piedad por ramas y subramas, les resulta a los humanos difícil y confuso de utilizar; demuestra, en cambio, con bastante claridad por qué la solución tiene casi 2^n pasos: cada vez que se utiliza el procedimiento, éste se



3. Ordenación de los 64 hexagramas del I Ching, según el rey Wen

repite a sí mismo por dos veces. Y aunque a los humanos les resulte difícil llevar a efecto un tal método de solución, a los ordenadores, no.

La figura 2 presenta parte de la solución para una torre de cinco discos. Se muestran en ella tres etapas, cuyo carácter es de procedimientos contenidos en un procedimiento mayor, llamado TORRE (n, $X \to Y$). Se utilizan en este procedimiento tres elementos de información: n, número de discos a trasladar; X, varilla origen, e Y, varilla destino.

Tal como la terminología induce a pensar, el armazón fundamental de un programa recursivo para el rompecabezas de la torre admite la descripción algorítimica siguiente:

TORRE (n, *origen* → *destino*):
  TORRE ($n - 1$, origen → auxiliar)
  LLEVAR (n, origen → destino)
  TORRE ($n - 1$, auxiliar → destino)

Supongamos que deban trasladarse cinco discos desde la varilla A (el origen) hasta la varilla B (el destino). Si asignamos a n el valor 5, y llamamos A al origen y B al destino, y siendo C la varilla auxiliar, tendremos

TORRE (5, A → B):
  TORRE (4, $A \to C$)
  LLEVAR (5, $A \to B$)
  TORRE (4, $C \to B$)

En otras palabras, el programa debe primero transferir los cuatro primeros discos de la varilla A a la C. En él se recoge el hecho de que cuando tal procedimiento ha concluido debe ejecutar LLEVAR (5, $A \to B$), es decir, llevar inmediatamente el quinto disco, el mayor de todos, de la varilla A a la B. Recoge también una segunda ejecución del procedimiento TORRE, esta vez, para trasladar los cuatro discos primeros desde la varilla C hasta la varilla B [*véase la figura 2*].

Cada invocación del procedimiento TORRE tiene por efecto la invocación de tres procedimientos más: TORRE, después LLEVAR y, a continuación, nuevamente, TORRE. El procedimiento LLEVAR no puede ejecutarse hasta concluir la ejecución del primer procedimiento TORRE. Lo cual significa que el orden real en que el ordenador lleva a cabo la tarea es ejecutar cuatro veces sucesivas TORRE, abriéndose camino por el lado izquierdo del diagrama, hasta que encuentra

TORRE (1, $A \to B$)
LLEVAR (2, $A \to C$)
TORRE (1, $B \to C$)

Un programa real habría de contener una instrucción adicional que informara al ordenador de que cuando el objeto de TORRE sea un único disco es preciso trasladarlo sin recurrencia alguna; concretamente, estamos diciendo que el primer disco ha de llevarse la varilla A a la varilla B. El procedimiento LLEVAR tiene entonces por efecto que el segundo disco se transfiera de A a C. Finalmente, el ordenador traslada el disco primero, ahora de la varilla B a la C, concluyendo la realización del tercer movimiento.

En este punto, el ordenador ha concluido también el primero de los procedimientos TORRE del recuadro de la penúltima fila de la figura 2. Como es natural, ejecuta entonces LLEVAR (3, $A \to B$) trasladando inmediatamente el tercer disco desde la varilla A hasta la B. Seguidamente, la instrucción TORRE (2, $C \to B$) se desarrolla en los tres movimientos explicados en el recuadro situado en lo más bajo de la ilustración.

Los siete movimientos dejan completa la ejecución de la primera invocación de TORRE del segundo nivel del diagrama, y el ordenador continúa, ajustándose a la misma pauta, unas veces descendiendo veloz hasta una caja de nivel bajo, y otras retrogradando hasta un nivel más alto. Acaba finalmente abriéndose paso por todo el diagrama, con lo que el rompecabezas queda resuelto.

Los procedimientos recursivos tienen muchas veces un aspecto mágico, porque toda la "teneduría de libros" necesaria para llevar cuenta de "dónde se está" la realiza el ordenador; las personas no muestran demasiada aptitud en tareas que exigen gran capacidad de memoria. Afortunadamente, se dispone de una técnica que requiere poca memoria. Hace cuatro años descubrieron Peter Buneman, de la Universidad de Pennsylvania, y Leon Levy, de AT & T Bell Laboratories, una pauta sencilla para la sucesión de jugadas. Buneman y Levy sugieren una simple alternancia entre dos tipos de jugadas:

1. Traslación del disco más pequeño, desde la varilla en que se encuentre, a la consecutiva en sentido de giro horario.

2. Traslación de cualquier disco, a excepción del mínimo.

El segundo paso no es tan arbitrario como se pudiera pensar, pues con esta restricción hay siempre únicamente

una jugada lícita, hasta que, súbitamente, queda resuelto el rompecabezas.

No hace mucho construí en madera un rompecabezas de ocho piezas y convencí a un amigo para que jugara un rato con él. Sin llegar a nada, tuvo al cabo que salir momentáneamente de la habitación. A toda prisa, expliqué la estrategia de Buneman-Levy a su hija de ocho años, que no había dejado de observar el juego con fascinación. Al volver mi amigo, quedó boquiabierto: su hija trasladaba con toda calma y seguridad los discos de una varilla a otra. En pocos minutos resolvió el problema. "¡Vaya hija tienes!", le dije.

La raíz de la solución Buneman-Levy es que para resolver el rompecabezas de la torre de Hanoi no es imprescindible la recurrencia; basta una sencilla solución iterativa. Los programas iterativos llevan a cabo tareas repetitivas por ejecución que un simple bucle, y no mediante una sucesión de recurrencias. Aunque los programas recursivos cuentan entre sus encantos los de elegancia y sobriedad de redacción, requieren a la hora de ejecutarlos gran espacio de almacenamiento. Por ejemplo, vista la ilustración de la solución por recurrencia del rompecabezas de la torre, resulta obvio que hará falta mucha memoria para conservar todas las ejecuciones incompletas de los procedimientos TORRE. El tipo de programa iterativo basado en la solución algorítmica Buneman-Levy apenas si requiere memoria. Pocas veces, no obstante, cabe sustituir un algoritmo recursivo por otro iterativo, como en este ejemplo.

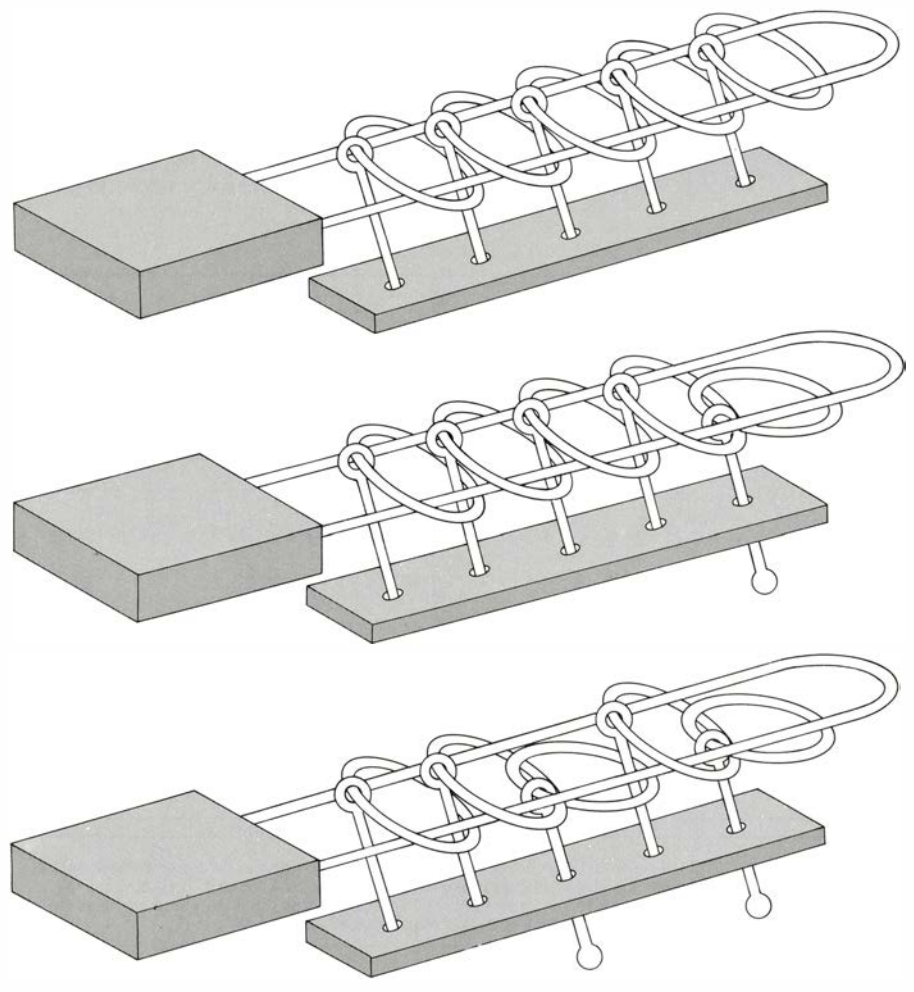
Recurrencia e iteración forman uno de los muchos sistemas polares de las ciencias de cómputo, un a modo de yin-yang de la resolución de problemas por procesamiento repetitivo. Los símbolos del yin y el yang representaron el principio de dualidad complementaria que late en el corazón de las más importantes tradiciones filosóficas de la China prerrevolucionaria. Los dos principios sirven de base al *I Ching* ("Libro de los cambios"). Yin y yang vienen a ser como las cifras binarias 0 y 1, fundamentales en cómputo digital. En el *I Ching*, el yin se representa por una línea horizontal de dos trazos (– –) y, el yang, por una línea continua (—). Estos símbolos se agrupan y conjuntan en series de seis, formando un total de 64 hexagramas. Cada hexagrama representa una elección particular. Los creyentes sacan pajitas de milhojas para determinar qué hexagrama tiene significación en su vida. La disposición de hexagramas que aquí vemos se atribuye al rey Wen, quien gobernó hacia el 1150 a. de C. (Las razones que motivaron esa ordenación las ha oscurecido el tiempo. Quedaré en deuda con los lectores que me den la clave de tan misteriosa colocación.)

Y al mencionar los números binarios, se me viene a las mientes otra forma más de resolver la Torre de Hanoi. Si numeramos los discos correlativamente, 1, 2, 3, ..., *n*, de menor a mayor, resulta que cada movimiento de la sucesión que resuelve el rompecabezas está indicado por un número binario. Por ejemplo, para resolver el rompecabezas en el caso de cinco discos, enumeraríamos los números binarios de cinco bits en el orden creciente habitual. Los nueve primeros números binarios de cinco bits son

0	0	0	0	0	
0	0	0	0	1	(1)
0	0	0	1	0	(2)
0	0	0	1	1	(1)
0	0	1	0	0	(3)
0	0	1	0	1	(1)
0	0	1	1	0	(2)
0	0	1	1	1	(1)
0	1	0	0	0	(4)

Cada número binario que tenga predecesor en esta serie tiene también exactamente un bit que acaba de cambiar de 0 a 1. La posición de este bit (contando desde la derecha) está dada por el número decimal que figura junto al binario. Estos números son también los números de los siete primeros discos trasladados, y la correspondencia es válida a lo largo de toda la sucesión de movimientos que componen la solución habitual. Armado de tan sólo uno de los números binarios de la serie, Timothy R. S. Walsh, miembro de mi departamento de la Universidad de Ontario Occidental, es capaz de reconstruir por ordenador el aspecto exacto que en ese estadio presenta el rompecabezas de la torre. Desafortunadamente, su algoritmo es demasiado largo para exponerlo aquí.

La mención del yin y el yang me da pie para presentar los llamados aros chinos [*véase la figura 4*]. Este rompecabezas consta de una larga horquilla de alambre cuyas puntas están insertas en un asa, más una serie de aros que circundan la horquilla. Cada aro está holgadamente anclado mediante un poste de metal a una plataforma de ma-



4. Las dos primeras jugadas del rompecabezas de las argollas chinas

dera situada bajo la horquilla. El poste que enlaza cada argolla con la plataforma pasa a través del aro por detrás (es decir, por la parte más próxima al asa) impidiendo la salida de la horquilla.

El objetivo es retirar de la horquilla todos los aros. Lo mismo que en el rompecabezas de la torre, los neófitos disfrutarán de amplias oportunidades de error. La ilustración muestra las dos primeras jugadas en el rompecabezas de cinco argollas. Para retirar un aro de la horquilla corremos hacia atrás la horquilla, si ello es posible, hasta el poste del aro situado justamente delante del aro a retirar. Este último anillo puede entonces hacerse pivotar hacia arriba, de modo que la porción oscilante del aro pase sin tropiezo por la extremidad de la horquilla. Haciendo correr la horquilla hacia delante podemos ahora inclinar la anilla hacia un lado, como para ponerla de canto, y hacerla pasar por dentro de la horquilla. Al resolver el rompecabezas, a menudo deben volverse a meter aros en la horquilla; en tales casos se sigue el procedimiento inverso.

Los intentos y tanteos de resolución del rompecabezas de los aros ponen de manifiesto el mismo problema general que planteaba la Torre de Hanoi: la aparición de configuraciones en las que han sido retirados de la horquilla diversos números de aros consecutivos, lo que, de nuevo, nos hace creer que de alguna manera ha de ser posible retirarlos todos. No nos sorprenderá, por tanto, saber que el rompecabezas de los anillos puede resolverse mediante un algoritmo recursivo del mismo tipo. Más todavía, existe incluso un procedimiento iterativo para resolver los anillos, de transparencia considerablemente mayor que el dado para la torre. Sería una lástima revelar aquí esta sencilla técnica, negando así a los lectores el placer de sentir su propia experiencia "¡Ajá!". Apenas puedo dar indicación alguna sin al mismo tiempo revelar la solución; baste decir que ésta puede enunciarse en una o dos frases, y que no requiere notación especial alguna.

Un poco más sorprendente resulta la casi identidad de ambos rompecabezas, lo que sugiere otro elemento de contraste, común en matemáticas y en informática: problemas que superficialmente parecen muy diferentes, al inspeccionarlos de cerca se demuestran idénticos en su esencia.

La conexión entre ambos rompecabezas nos la ofrecen dos códigos binarios, más un algoritmo que traduce uno en otro. Al igual que representamos los movimientos de los discos en el rompecabezas de la torre mediante números binarios consecutivos, así introduciremos aquí un nuevo código binario a fin de representar los movimientos de los anillos: un 1 representa un aro inserto en la horquilla; un 0 es un anillo fuera de ella. El rompecabezas de los cinco anillos puede representarse entonces por una secuencia de cinco dígitos, compuesta por ceros y unos; la cifra situada en el extremo izquierdo de tal secuencia representa el aro más cercano al asa. Denotadas por medio de estas secuencias, las cuatro primeras configuraciones del rompecabezas son:

1 1 1 1 1 (todos los anillos insertos)
1 1 1 1 0 (primer anillo fuera)
1 1 0 1 0 (primer y tercer anillos fuera)
1 1 0 1 1 (tercer anillo fuera)

En las dos jugadas siguientes se retiran, primero el segundo anillo, a continuación, el primero. Seguidamente, se retira el quinto aro. Después, como preparación para retirar el cuarto, es preciso reinsertar los tres primeros. En total, bastan 21 jugadas para retirar la totalidad de los cinco. Las cuatro últimas configuraciones se expresan así:

0 0 0 1 0 (segundo anillo puesto)
0 0 0 1 1 (primer y segundo anillos puestos)
0 0 0 0 1 (primer anillo opuesto)
0 0 0 0 0 (todos los anillos fuera)

Los lectores podrían encontrar de su agrado obtener los 14 números de código que faltan para resolver del todo el rompecabezas de los anillos por este método. Basta ajustarse a dos sencillas reglas, que representan las ligaduras que se imponen mutuamente los anillos adyacentes:

1. El dígito situado en el extremo derecho del número puede cambiarse (de 0 a 1, o de 1 a 0) siempre que se quiera.

2. El otro único dígito que puede cambiarse es el situado inmediatamente a la izquierda del primer 1 que encontraremos contando desde la derecha.

A primera vista no parece que exista relación alguna entre la serie de 22 números codificados en binario y la sucesión de números binarios consecutivos generada por el rompecabezas de la torre. En realidad, sí hay una relación, que se vale del código Gray, así llamado en honor del ingeniero Frank Gray, quien lo inventó en el decenio de 1930, en los AT & T Bell Laboratories, cuando iba en búsqueda de una técnica de corrección de errores en las comunicaciones electrónicas. El código Gray se explica en la figura 5. En esa misma ilustración se muestran los 22 primeros números binarios y, a su lado, sus correspondientes en codificación Gray.

Al examinar los números en código Gray de la figura se nos muestra una

	CODIGO BINARIO	CODIGO GRAY		CODIGO BINARIO	CODIGO GRAY
0	0 0 0 0 0	0 0 0 0 0	11	0 1 0 1 1	0 1 1 1 0
1	0 0 0 0 1	0 0 0 0 1	12	0 1 1 0 0	0 1 0 1 0
2	0 0 0 1 0	0 0 0 1 1	13	0 1 1 0 1	0 1 0 1 1
3	0 0 0 1 1	0 0 0 1 0	14	0 1 1 1 0	0 1 0 0 1
4	0 0 1 0 0	0 0 1 1 0	15	0 1 1 1 1	0 1 0 0 0
5	0 0 1 0 1	0 0 1 1 1	16	1 0 0 0 0	1 1 0 0 0
6	0 0 1 1 0	0 0 1 0 1	17	1 0 0 0 1	1 1 0 0 1
7	0 0 1 1 1	0 0 1 0 0	18	1 0 0 1 0	1 1 0 1 1
8	0 1 0 0 0	0 1 1 0 0	19	1 0 0 1 1	1 1 0 1 0
9	0 1 0 0 1	0 1 1 0 1	20	1 0 1 0 0	1 1 1 1 0
10	0 1 0 1 0	0 1 1 1 1	21	1 0 1 0 1	1 1 1 1 1

Los números de cinco cifras en código Gray se deducen del número binario correspondiente mediante una sencilla regla: leyendo las cifras, de izquierda a derecha, la primera cifra de la codificación Gray es siempre el primero de los dígitos del número binario; en lo sucesivo, cada dígito Gray será un 1 si el dígito binario correspondiente es distinto de su predecesor; en caso contrario, será 0.

5. Codificación Gray de los primeros 22 números binarios

notable coincidencia. ¡Tomados en orden retrógrado, los números Gray son precisamente las sucesivas posiciones de los aros de una solución del rompecabezas de los anillos chinos.

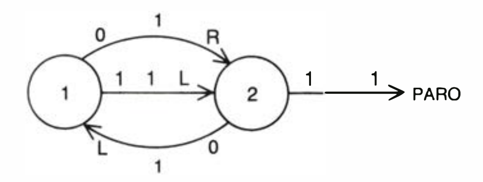
Estas son, así pues, las 21 posiciones que forman una solución del rompecabezas de los cinco aros. Pero para quedar resuelto por completo, el rompecabezas de la torre requiere, con cinco discos, 31 movimientos. Se podría pensar que si ambos problemas son, en algún sentido, idénticos, sus soluciones deberían constar del mismo número de jugadas. La discrepancia desaparece, no obstante, al examinar la codificación Gray de los números posteriores al 21. Cada uno de ellos representa una posible configuración en el rompecabezas de los anillos, y el último de todos (que se corresponde con el número binario 11111) es 10000, configuración en que sólo el último aro está inserto en la horquilla. De donde resulta que si queremos hacer aún más difícil el rompecabezas de los aros, basta con presentarlo con todos los aros, salvo el último, fuera de la horquilla. Ahora el número de jugadas precisas para resolver el rompecabezas de n argollas es precisamente $2^n - 1$, lo mismo que el rompecabezas de los n discos.

Sydned N. Afriat, profesor de economía y matemáticas de la Universidad de Ottawa, ha escrito hace poco un libro muy informativo sobre los aros chinos; titulado *The Ring of Linked Rings* (El anillo de aros enlazados), lo editó Generald Dickworth & Co. Ltd. Debo a Afriat la idea de relacionar el rompecabezas chino con la noción de dualidad del yin y el yang. Aunque Afriat sospecha que el origen de los aros chinos sea efectivamente chino, tan sólo tiene referencias definidas a partir de 1550. El libro de Afriat describe también el "código de Gros", una prefiguración decimonónica del código Gray, debida al matemático francés Louis A. Gros, quien publicó en 1872 un tratado sobre el rompecabezas. Por cierto, en Francia al rompecabezas lo llaman Le Baguenodier, y los ingleses lo han bautizado The Tiring Irons.

Hay en ambos rompecabezas muchos otros aspectos que es imposible comentar aquí por falta de espacio. Por ejemplo, Leroy J. Dickley, del departamento de matemáticas puras de la Universidad de Waterloo, en Ontario, me recordó que resolver los aros chinos equivale a dar un recorrido de las aristas de un hipercubo n-dimensional.

Pudiera hacerse notar que el rompecabezas de la torre, con n discos, puede resolverse en $2^n - 1$ movimientos si se usan tres varillas, mientras que con $n + 1$ varillas el número de movimientos necesarios es $2n - 1$, muchísimo menor. ¿Qué sucede cuando el número de varillas esté comprendido entre 3 y $n + 1$? ¿Cómo depende el número mínimo de jugadas necesarias para una solución del número de varillas disponibles? Valdría la pena dedicar más adelante un artículo a dar persecución y respuesta a esas cuestiones. Al tiempo de escribir yo este artículo sé que hay gente rompiéndose la cabeza con la variante de cuatro varillas, y también con la que Martin Gardner llama "versión perversa de la Torre", un rompecabezas japonés, puesto a la venta con el nombre comercial de PANEX.

Los tres problemas concernientes a castores atareados del artículo de octubre los resolvió Martin J. Maney, de Palatine, Illinois. Vemos aquí su castor afanoso de dos estados. Comenzando con una cinta en blanco, produce cuatro unos antes de detenerse.



Las soluciones de Maney se resumen mejor en forma verbal. Una máquina de Turing que borre un único 1 de una cinta, por lo demás en blanco, se vale de dos unos como marcadores. En cada fase va y viene de un uno a otro, verificando cada vez si justamente al otro lado de cada marca se encuentra el 1 que se ha de borrar. De ser así, la máquina borra los tres unos, y se detiene. Si no, la máquina lleva el marcador un cuadro más afuera, y vuelve a examinar el otro marcador. La máquina limpiadora de múltiples unos funciona de modo semejante, pero no llega jamás a detenerse. ¿Cómo podría hacerlo, si quedan siempre porciones no exploradas en la cinta que podrían contener unos? También Peter J. Marineau, de Troy, Nueva York, y Dave Kaplan, de Deer Park, Nueva York, dieron con castorcitos afanosos de dos estados. Marineau resolvió, además, el problema del limpiacintas, describiendo las marcas móviles como "escobas" que barren la cinta.

Raphael M. Robinson, de Berkeley, California, redactó un programa de simulación de una máquina de Turing para su IBM PC. Al observar cómo el castorcito que Uwe Schult conjetura ser afanoso iba escribiendo sus 501 unos, Robinson observó que antes de detenerse producía una pauta recurrente de ceros y unos en alternancia, de longitud cada vez mayor. Partiendo de una cinta en blanco, las sucesivas longitudes de esta serie eran de 0, 6, 13, 28, 48, 78, 121, 190, 289, 442 y 667. La última serie contenía 501 unos. Se le ocurrió a Robinson investigar cuál sería la conducta de la máquina de Schult al alimentarla, no con una cinta en blanco, sino con una de las series alternantes de ceros y unos. Comenzando con una secuencia de longitud 9 (que contenía cinco unos), la máquina tardó en detenerse 12.870.233 pasos, tras haber producido una nueva pauta que contenía 4911 unos. Hicieron falta para ello tres veces el espacio y 25 veces más números de pasos que los realizados por la máquina de Schult cuando éste comenzaba con una cinta en blanco. Que tan modestos cambios en la cinta inicial pudiesen producir tan extravagante conducta dejó bastante inquieto a Robinson. "Me parece", escribe Robinson, "que estos resultados arrojan serias dudas acerca de la validez de las restricciones de espacio y tiempo impuestas por Schult".

Al parecer, no fue Bruno Weimann (de la Universidad de Bonn) el primero en descubrir un castor afanoso de cuatro estaaos. Allen H. Brady, hoy en la Universidad de Nevada en Reno, descubrió el suyo una decena de años antes que Weimann. En aquel entonces, Brady se encontraba en la Universidad estatal de Oregon. La mascota de la universidad es el castor, y el ordenador de que se valió Brady en su investigación estaba instalado en la cercana Beaverville ("Castorcity", macarrónicamente).

Allan Brady comparte el escepticismo de Robinson. "Sé, por la resolución del problema en el caso de cuatro estados, que el problema pentaestado dista de su dilucidación. La clave de la cuestión reside en establecer que cada una de las máquinas que presuntamente salen escapadas no llegará jamás a detenerse... Conforme las máquinas se hacen más complejas, tal prueba se hará más y más difícil, para acabar abarcando problemas matemáticos muy profundos y no resueltos... Los problemas de la detención de máquinas concretas inicialmente provistas de cintas en blanco se convierten, en esencia, a partir de cierto punto, en teoremas matemáticos individuales."

Taller y laboratorio

Una bola de cojinete que facilita el estudio de la luz y que, además, sirve de lente

Jearl Walker

Si le pidiéramos a cualquiera que imaginase aplicaciones posibles de una bola de cojinete, a nadie se le ocurriría convertirlo en instrumento para estudiar la luz, ni en lente fotográfica. Pero puede ser ambas cosas. De ahí arranca toda una historia en torno a la naturaleza de la luz.

¿Está la luz formada por ondas? Esta idea, en los primeros años del siglo XIX, topaba con una gran oposición; por entonces, los físicos seguían aún tenazmente aferrados a la teoría corpuscular de Newton. Pero en 1818, en un concurso celebrado por la Academia Francesa, Augustin Jean Fresnel propuso un modelo ondulatorio para la luz. En la comisión dictaminadora se encontraban los matemáticos Pierre Simon de Laplace y Siméon Denis Poisson y los físicos Dominique François Arago, Jean Baptiste Biot y Joseph Louis Gay-Lussac.

El trabajo de Fresnel encontró oposición particularmente en Poisson, quien, para desacreditarlo, propuso un experimento imaginario. Supongamos, planteó, un haz luminoso que ilumine un objeto opaco de sección transversal circular. Entonces, según el trabajo de Fresnel, en el centro de la sombra del objeto debe aparecer una mancha luminosa. Pero como tal resultado se creía absurdo, el modelo debía ser erróneo.

Arago no tardó en montar el experimento y descubrió la mancha luminosa, con lo que quedaron vindicados tanto Fresnel como su modelo ondulatorio. La verdad es que en 1773 otros investigadores habían observado la mancha, pero se la echó en olvido. Hoy recibe, irónicamente, el nombre de mancha de Poisson: aparece rodeada de círculos claros y oscuros, todos dentro de la sombra de la esfera o disco que la crea.

En un experimento ilustrativo de este hecho, ideado por Dale Blaszczak, de la Universidad estatal de Cleveland, fotografié la figura que proyectaba una bola de conjinete. La empleamos también como lente para que formara una imagen en su sombra. La figura de Poisson y la imagen de cada bola opaca proceden ambas de la difracción, propiedad ésta debida a la naturaleza ondulatoria de la luz.

En ocasiones la propagación de la luz se imagina considerando minúsculos generadores de onda situados, en cada instante, en todo el frente de onda. Tales generadores, que no son sino ficciones matemáticas, emiten pequeñas ondas con gran intensidad hacia adelante (en la dirección en que viaja la luz), con menor intensidad hacia los lados y con intensidad nula hacia atrás. Cuando esas ondas interfieren entre sí (se solapan) recrean el frente de onda por delante de su posición anterior. Así se describe el movimiento del frente de onda mediante la generación y la interferencia continuas de las pequeñas ondas de los generadores.

Pese a que no existan los generadores ni sus ondas, éstos facilitan la representación de numerosos aspectos de la luz. Un ejemplo importante de esto lo constituye la difracción de la luz por una rendija angosta (del ancho de una hoja de afeitar) practicada en una pantalla opaca. Cuando el frente de onda penetra en la rendija, la pantalla elimina la mayor parte del mismo, junto con la mayoría de los generadores. Los generadores restantes siguen emitiendo ondas hacia adelante, pero ya no se interfieren hasta el punto de recrear el frente de ondas precedente. Ahora la luz no se propagará en línea recta por la rendija, sino que se esparcirá a partir de ella.

Observamos esa dispersión cuando la luz intercepta una superficie, una hoja de papel por ejemplo. Se verán muchos lugares fuertemente iluminados, pues las ondas que llegan a ellos están en fase y se interfieren constructivamente; es decir, las crestas de las ondas llegan simultáneamente y crean una onda luminosa de gran amplitud. Otros lugares se muestran oscuros porque las ondas arriban en oposición de fase y se interfieren destructivamente: la cresta de una onda llega con el seno de otra y, así, se contrarrestan.

La extensión de esta figura de lugares claros y oscuros depende del tamaño de la rendija. Supongamos que ésta sea rectangular y que su lado mayor esté vertical. Así se creará una figura muy amplia horizontalmente y limitada verticalmente. Se forma "la figura de difracción de la rendija".

A veces la forma de una abertura y su figura de difracción están relacionadas de un modo sencillo. Por ejemplo, una abertura en forma de *H* consta esencialmente de tres ranuras. La corta horizontal crea una figura de difracción vertical; las dos verticales dan unas figuras horizontales que se solapan.

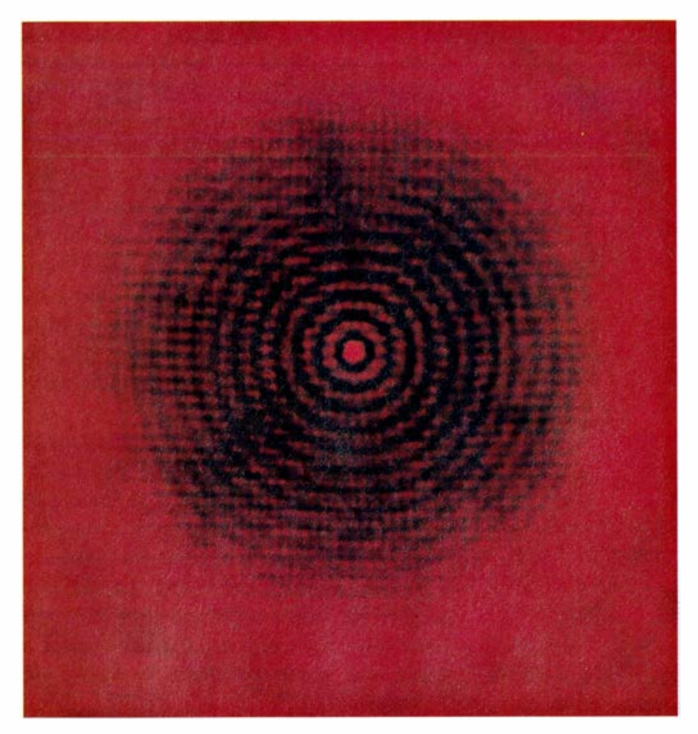
En la figura 5 se ofrecen unas figuras de difracción creadas por unas aberturas cuyas formas invito al lector a que adivine. Todas ellas corresponden a una letra que tecleé en mayúscula gótica sobre papel pulido. Luego fotografié cada una con película Kodak para fototipia positiva y las revelé con el equipo especial para esa película. Las diapositivas salieron opacas salvo en las letras, que salieron transparentes.

Para fotografiar las figuras de difracción monté cada diapositiva dentro del haz procedente de un láser de helioneón de modo que la letra quedara completamente iluminada. A unos 20 metros de la otra cara de la diapositiva coloqué una cámara de 35 milímetros coincidente con la figura de difracción. A la cámara le retiré el objetivo para que aquélla iluminase directamente la película al disparar el obturador.

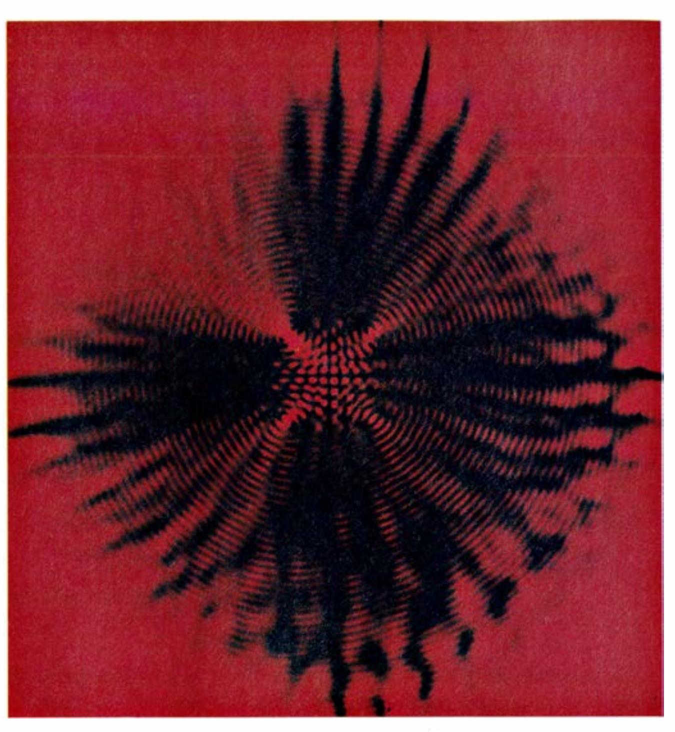
Con las luces apagadas fotografié cada figura con distintas velocidades de obturador. ¿Es capaz de adivinar cada letra por su figura de difracción? Como pista puedo decirles que las letras se encuentran más o menos en el lugar que le corresponde a cada una en un nombre que estuvo mucho tiempo asociado a esta revista, pero he eliminado toda letra repetida y no puedo garantizarles que las figuras estén bien orientadas.

Cuando la abertura es circular hay otro procedimiento para explicar la difracción. En torno a su centro se hallan las zonas de Fresnel, las cuales dirigen la luz hacia el papel que posibilita la observación de los anillos de la figura de difracción.

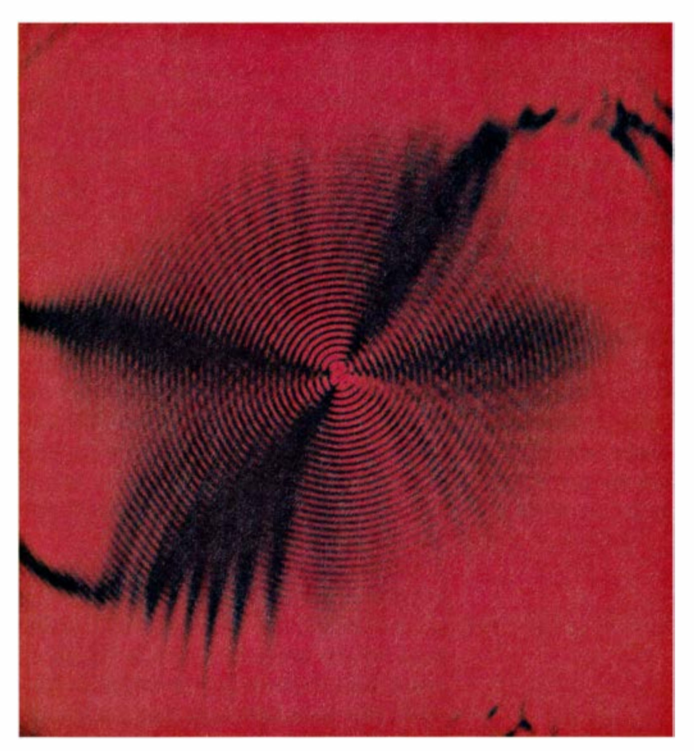
Obsérvese el centro de la figura. Dada la diferencia entre sus recorridos la luz que a él llega procedente de la zona central está en exacta oposición de fase con la que procede de la segunda. Por la misma causa, la luz que llega de la tercera zona alcanza el centro de la figura de difracción en exacta oposición de fase con la contribución de la segunda zona. Las zonas de orden superior se definen de modo similar. Cada zona envía una luz (al centro de la figura) que se halla en oposición de fase con la luz de las zonas adyacentes.



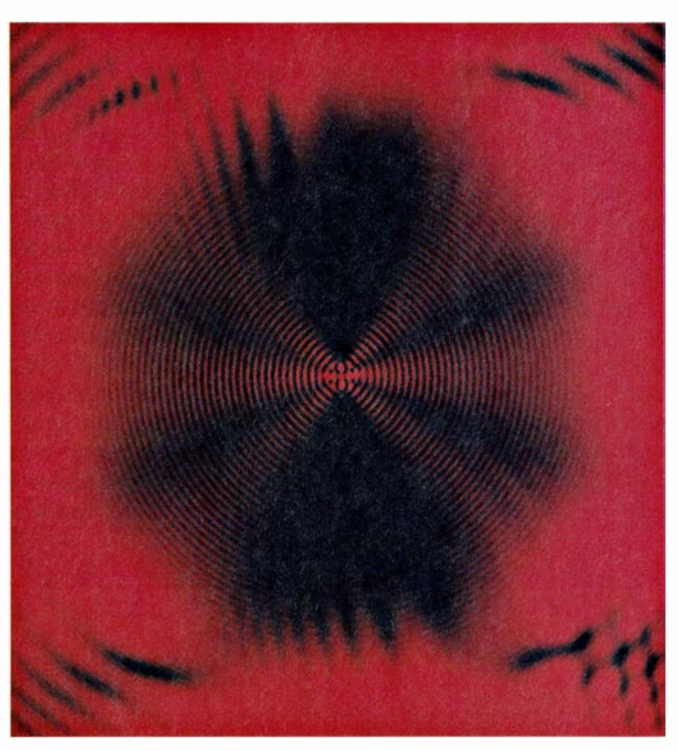
1. Figura de Poisson de una bola



2. Retículo en la sombra de una bola



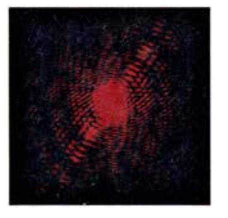
3. Imagen por difracción de un 2



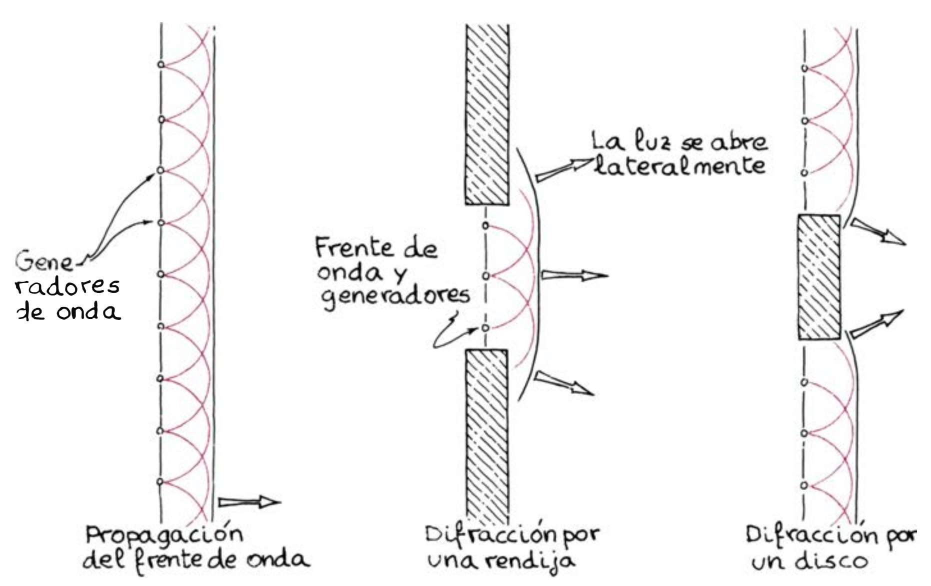
4. Imagen por difracción de una **I**








5. Figuras de difracción que insinúan un nombre



6. Propagación de la luz mediante generadores de onda

El tamaño de las zonas depende de las distancias entre la abertura, la fuente luminosa y el papel. Así, tales distancias determinan el número de zonas que se encuentran en la abertura. Supongamos que el papel esté suficientemente alejado para que la zona central llene la abertura. Entonces, el centro de la figura de difracción aparecerá luminoso. Y si el papel se acerca más, en la abertura se distinguirá una segunda zona. Así, el centro de la figura de difracción aparecerá oscuro porque la luz procedente de la zona central y la que viene de la segunda zona se interfieren destructivamente.

Cuando el papel se acerca aún más, se presenta, en la abertura, la tercera zona. Aunque la luz procedente de la zona central y la procedente de la contigua siguen contrarrestándose, el centro de la figura de difracción aparece iluminado por la luz procedente de la tercera zona. Y, a medida que el papel se mueve hacia la abertura, el centro de la figura aparece alternativamente claro (cuando es impar el número de zonas que llenan la abertura) y oscuro (cuando es par el número de zonas).

A causa del llamado factor de oblicuidad, en las etapas oscuras la luz no se desvanece nunca por completo. En efecto, la luz de cada zona se proyecta más acusadamente en la dirección de progresión, pero menos acentuadamente hacia los lados. Entonces, la luz procedente de una zona de gran radio será así un poco más débil en el centro de la figura de difracción que la de una zona contigua de radio menor. Estas dos contribuciones se interferirán destructivamente en la hoja de papel, pero no se destruirán del todo.

Con objetos opacos pueden asimismo crearse figuras de difracción. Este fenómeno lo estudió Blaszczak examinando la figura de Poisson que arroja un disco metálico circular de unos 10 milímetros de diámetro. Encoló el disco a un alambre metálico delgado (galga del 30); suspendió éste entre dos pinzas sujetas a un soporte anular. El disco estaba a unos 10 metros del láser, cuyo haz lo ensanchaba una lente. La sombra caía así sobre un papel blanco situado a 30 metros detrás del disco. Tras ajustar la orientación del disco, Blaszczak examinó con lupa la pequeña sombra. Cuando el disco se encontraba perpendicular al haz (presentando una sección transversal circular) aparecía la figura de Poisson.

Para desparramar la luz, Blaszczak colocaba una lente delante del láser. Recolimaba a continuación la luz en un haz más ancho no divergente. (Para recolimar se hace que la primera lente enfoque la luz a un estenope. La luz que lo atraviesa pasa seguidamente por una lente cuyo foco está en el estenope.) En todos los casos aparecía la figura de Poisson.

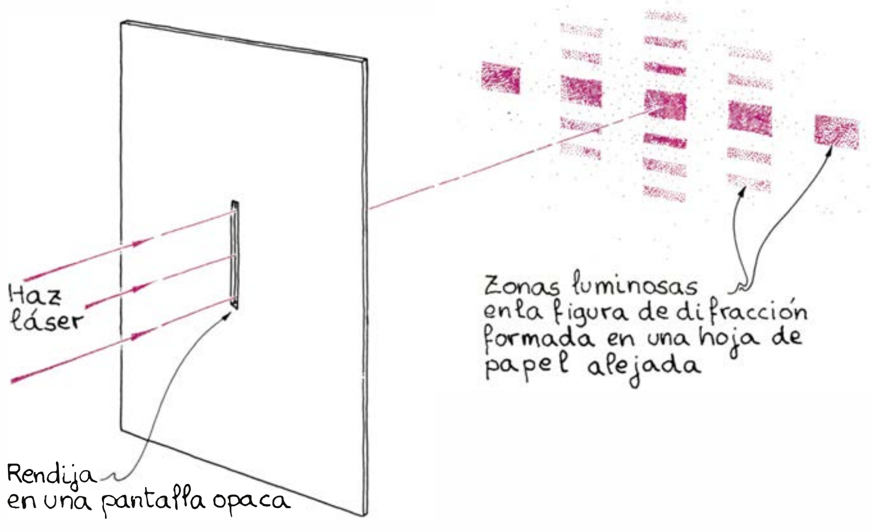
Colocando en la luz recolimada una diapositiva con un rostro, aproximadamente equidistante del láser y el disco, probamos a formar una imagen con éste. La zona de sombra presentó una complicada figura de difracción, pero nada que se asemejara a un rostro.

Sustituimos entonces el disco por una bola de cojinete redonda y pulida. La pieza arrojó una brillante figura de Poisson. Abriendo el haz del láser y acercando luego a éste la bola conseguimos una figura más extensa. De este modo, la distancia entre la bola y el papel donde se observaba la figura resultaba mayor.

Examinamos la figura con una lupa. Empleamos luego una cámara como instrumento de aumento. Con el objetivo retirado y la cámara interceptando la sombra de la bola, miramos por el visor y vimos una figura de Poisson ampliada.

Debo advertir que este dispositivo es peligroso. Al mirar por el visor de una cámara situada en el camino de un haz láser, el ojo enfoca la luz a la retina. Y ésta puede dañarse, con la ceguera consiguiente, si la figura es muy luminosa. La única sensación en este caso podría ser que la luz resulta desagradablemente brillante, sin que nos demos cuenta de todo el daño que recibimos.

Es mucho más seguro examinar la figura del papel mediante una lupa, pues así la intensidad de la luz queda reducida por la difusión en el papel. (Nosotros miramos por el visor porque, en el papel, la figura es muy pequeña y cuesta verla.) Pero incluso con papel subsiste el peligro si el láser es de gran potencia. La potencia nominal del nuestro es de 10 miliwatt, lo cual significa que su



7. Difracción en una rendija

potencia de salida máxima es de 10 miliwatt. Las figuras que observamos hubieran podido generarse con la misma facilidad con un láser menos potente.

Un experimento interesante puede ser fotografiar una figura de Poisson formada sobre un papel. Para ello se coloca la cámara desplazada hacia un lado al objeto de que no obstaculice el paso de la luz hacia el papel. Ahora bien, bajo ese ángulo, la figura no será circular; se gira, pues, el papel de modo que una perpendicular al mismo quede equidistante de la luz incidente y la visual de la cámara.

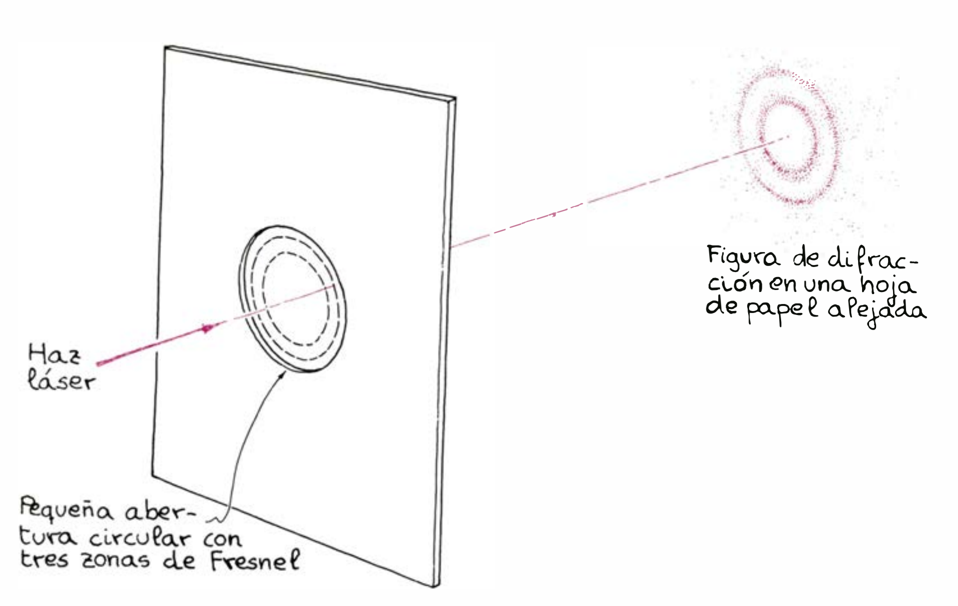
Esta última debe poseer un objetivo capaz de enfocar la figura sobre la película. Con esta disposición mis intentos fueron decepcionantes, pues la luz difundida por el papel solía acabar emborronando la delicada figura de Poisson.

Probé de otro modo. Con las luces apagadas y sin objetivo coloqué la cámara directamente en la sombra de la bola y expuse la película a varias velocidades. Con película de color ASA 400, obtuve las mejores fotos empleando los tiempos de exposición menores, usualmente 1/1000 o 1/500 de segundo. Si el láser es débil, recomiendo película de sensibilidad ASA 1000. Para mis clases prefiero diapositivas en color (ASA 400) que permiten proyectar los resultados.

La figura de Poisson proviene de la difracción de la luz alrededor de los costados de la bola. Supongamos que ésta sea iluminada por una luz de frente de onda plano. Cuando llegue a la bola, parte de sus generadores matemáticos serán bloqueados y eliminados por la misma bola. Los restantes seguirán generando pequeñas ondas hacia adelante, pero la interferencia entre éstas ya no podrá recrear el frente de onda original. En vez de ello, parte de la luz se diseminará por la zona en sombra de la bola.

Todos los generadores del frente de onda que traspasa la bola están en fase. Cuando la onda luminosa llega al papel, su fase y la interferencia la determinan la distancia recorrida. La luz que llegue al centro de la sombra desde un costado de la bola habrá viajado exactamente la misma distancia que la procedente del costado opuesto. Esta luz permanece en fase, se interfiere constructivamente y produce la mancha de Poisson.

Rodeando a la mancha aparece un círculo oscuro, creado por la interferencia destructiva. Consideremos un punto cualquiera de ese círculo. Es oscuro porque la luz procedente de un costado de la bola debe recorrer un trecho mayor que la procedente del costado directamente opuesto. Esa distancia demás pone a las dos ondas en exacta oposición de fase.



8. Zonas de Fresnel en una abertura circular

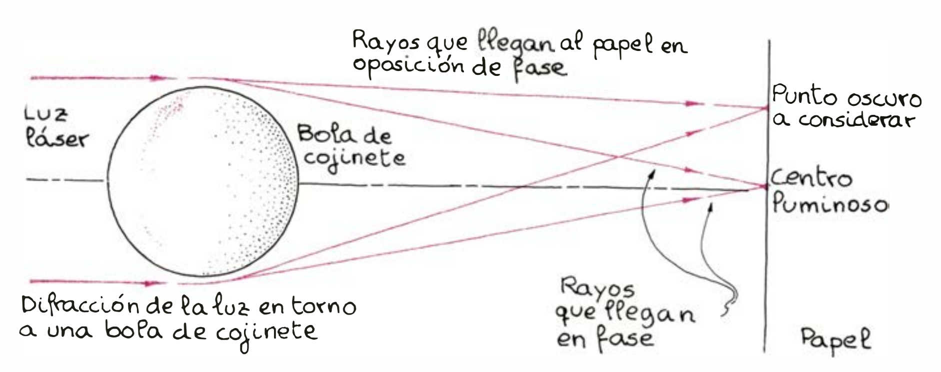
Un poco más alejado del centro hay un círculo debido a la interferencia constructiva. Aquí también la luz procedente de un costado de la bola debe recorrer una distancia mayor que la procedente del costado directamente opuesto; la distancia extra pone ahora las ondas otra vez en fase. (Una de las ondas se retrasa con respecto a la otra una longitud de onda completa.) En torno a la mancha de Poisson se dibujarán círculos luminosos y oscuros.

Esta figura puede explicarse también en función de las zonas de Fresnel. La bola obstaculiza la luz procedente de las zonas centrales. (En nuestro montaje experimental son varios centenares de zonas.) Inmediatamente fuera de la bola se encuentra la primera zona expuesta. El centro de la sombra recibirá luz desde esta zona y desde todas las demás expuestas que se hallen a distancias mayores del centro. Como las zonas adyacentes están en oposición de fase una con otra, se interferirán destructivamente. Ahora bien, el factor de oblicuidad disminuye las contribuciones de cada una de las más externas de suerte que la intensidad en el centro de la sombra resulta más o menos un cuarto de lo que sería si sólo lo iluminara la primera zona expuesta.

Consideremos las zonas que iluminan un punto del primer círculo oscuro de la figura de Poisson. La bola vista desde tal punto no está centrada en las zonas. O sea, algunas de las zonas cercanas a la bola están expuestas sólo parcialmente. De lo que resulta que las zonas se contrarrestan una con otra y el punto consiguiente de la figura de Poisson aparece oscuro.

Atendamos luego a un punto del primer círculo brillante de la figura de Poisson. Para este punto la bola estará aún más descentrada con respecto a las zonas y volvemos a que algunas de las zonas cercanas a la bola están expuestas sólo parcialmente. Pero esta vez el resultado global es claridad.

Si la bola presenta una sección transversal no circular al haz láser, la figura de Poisson aparece deformada o no aparece. Se deduce que los generadores de onda de un lado de la pieza carecen de parejas simétricamente dispuestas en el lado opuesto. Hablando de las zonas de Fresnel, diríamos que las más internas no están del todo expuestas



9. Formación de una figura de Poisson con una bola de cojinete

porque le falta simetría a la bola. La figura resultante en el papel puede ser complicada. Con asimetría suficiente, las porciones expuestas de las zonas pueden anular la luz en todos los puntos del papel, dejando la sombra a oscuras.

Como el cojinete difracta la luz hacia su sombra, produce una imagen un poco al modo de lente convexa, pero construyéndola por difracción y no por refracción. Creía con Blaszczak que la imagen se formaría con mayor facilidad con la bola, pues el disco hay que orientarlo con mucho esmero para que ofrezca una sección transversal circular al haz láser.

Empezamos por conseguir una figura de Poisson brillante. Luego, en el haz pusimos una diapositiva opaca que tenía un 2 transparente. Este número, iluminado totalmente, creó una figura de difracción de un lado a otro de la bola. Cambiamos gradualmente la posición de éste a la vez que inspeccionamos su sombra a la busca de una imagen del 2.

Pasamos dos días buscando en vano. Trasladamos entonces el experimento a dos salas comunicadas por una puerta que nos permitió ampliar la base hasta unos 80 metros. En un extremo pusimos el láser, la hoja de papel en el otro y la bola aproximadamente equidistante de ambos. Sustituimos el tosco soporte del cojinete por monturas micrométricas para así poder variar poco a poco la posición de aquél. Una montura movía verticalmente la bola y, horizontalmente, la otra.

Parte de nuestras dificultades la presentaba la figura de difracción que arrojaba el alambre al cual habíamos encolado la bola. A veces una porción de esa figura se extendía sobre la región en la cual buscábamos el 2. Probamos además con diapositivas de letras y otros números.

Finalmente, experimentamos con una diapositiva de un retículo de rayas negras, separadas éstas unos dos milímetros. Imaginó Blaszczak que aquel dibujo repetitivo podría hacer menos crítico el posicionamiento de la bola. Acertó. Al examinar la sombra, encontramos en su centro una imagen del retículo. Por fuera de la sombra se veía la porción de la figura de difracción original del retículo que había contorneado a la bola. Pero la figura central se debía exclusivamente a que la bola había difractado parte de la luz y la había enviado a la región de sombra.

Armados de mayor paciencia retornamos a la diapositiva del 2. Ajustamos la colocación de la bola en la figura de difracción arrojada por el 2. Variamos la distancia entre la diapositiva y la bola y entre ésta y el papel (o la cámara). Casi siempre el centro de la sombra consistió en una complicada figura de difracción que nunca se asemejaba al guarismo de marras. Por fin lo logramos con la bola aproximadamente en el centro de la figura de difracción procedente de dicho número.

¿Era aquella figura verdaderamente una imagen de la diapositiva, o se trataba de una orientación feliz de franjas de interferencia oscuras y claras? Hay un modo de comprobarlo: examinar la orientación de la imagen; si la bola hace de lente convexa, la imagen estará invertida y trastocadas la izquierda y la derecha con relación a la orientación del objeto. La imagen del 2 que descubrimos presentaba tal reorientación.

Vista desde el láser, la diapositiva nos ofrecía un 2 invertido y trastocado; lo que se veía en el papel era el número correctamente orientado. Acertamos asimismo a formar la imagen de una *I*, pero nunca lo logramos con formas más complicadas, tales como un rostro. (Hay viejos textos de óptica que hablan de investigadores que formaron imágenes de rostros con monedas o esferas metálicas, pero no entran en detalles.)

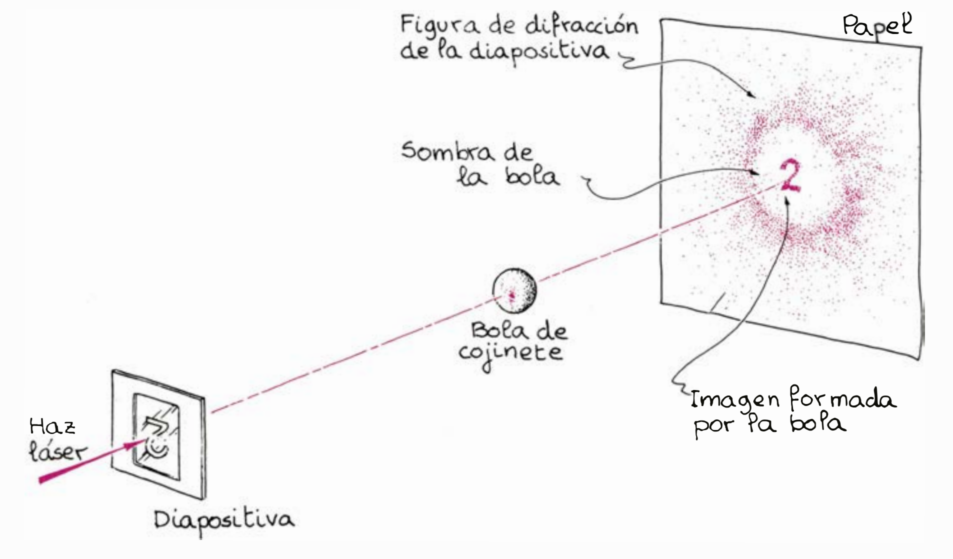
Para entender cómo puede formarse una imagen invertida en la sombra de la bola imaginemos una diapositiva con dos estenopes situada en un haz láser. Para la bola, cada estenope actúa de fuente luminosa puntual creadora de una figura de Poisson, centrada en una recta definida por el estenope y el centro de la bola. Las manchas nucleares de estas figuras son las imágenes de los estenopes y su separación es igual a la de éstos si la bola equidista de la diapositiva y el papel. Pero si la bola está más cerca del papel, las imágenes quedan más juntas; y más separadas si la bola se acerca al papel. La bola puede ampliar la separación entre los estenopes.

A causa de la fuerte distorsión por el solapamiento de las figuras de Poisson que rodean a las imágenes de los estenopes, éstas son mucho más borrosas con la bola que con una lente. En función del alineamiento de la diapositiva y la bola, el solapamiento produce un gran número de dibujos diferentes, algunos de los cuales dificultan el reconocimiento de la imagen.

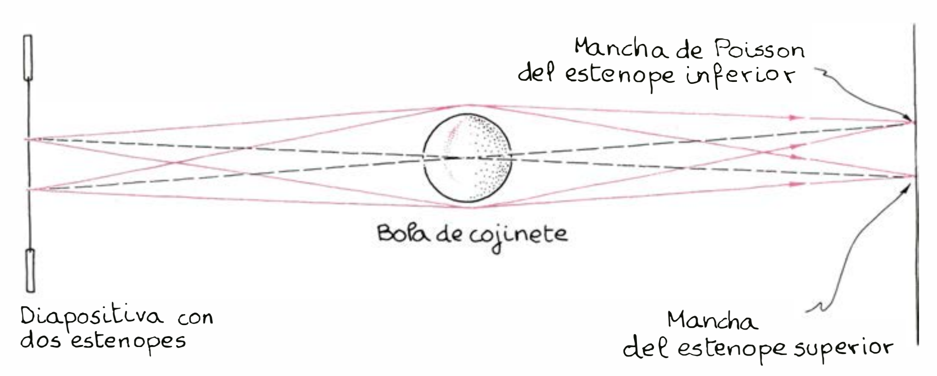
Probablemente nuestro fácil éxito en obtener la imagen del retículo se debiera a la repetición del motivo. Habitualmente, las líneas claras y oscuras cercanas al centro de la sombra confunden la imagen del objeto. Pero si éste es un retículo, aquellas líneas se ven obligadas a tomar una formación reticular y, con ello, facilitan la identificación de la imagen.

Cuando en el haz láser se ponen otras diapositivas debe resultar una formación de imágenes y distorsiones similares. Por ejemplo, una abertura en forma de *I* puede considerarse como una serie de estenopes que forman la letra y cada uno de los cuales crea una mancha de Poisson en el centro de la sombra de la bola. Si la formación de imágenes lo acierta, la composición de éstas dibujará una *I*.

Al probar esta experiencia, encontramos un rosario de manchas de Poisson, rodeada cada una de un anillo oscuro. El solapamiento de las figuras daba a veces dos líneas oscuras y aproximadamente paralelas que, más de cerca, perfilaban una *I*. Al poner una *M* en el haz aparecía una distorsión similar. Ajustando adecuadamente la posición de la bola, las imágenes de los trazos verticales de la *M* se asemejaban a la imagen de una *I*. Los trazos internos parecían pequeñas manchas.



10. Formación de la imagen de un 2 con una bola de cojinete



11. Formación de la imagen de dos estenopes

Muchas veces la figura de difracción que proyectaba el alambre de suspensión parecía distorsionar el centro de la sombra de la bola. Para salvar este inconveniente encolamos la bola a un portaobjetos de microscopio, que sujetamos con cinta adhesiva a las monturas micrométricas. Así, aunque los pequeños arañazos del vidrio aún deformaban un poco las figuras en la sombra de la bola, éstas eran más nítidas que antes.

Nos planteamos qué acontecería si se obstaculizara parte de la luz que se difracta en torno a la bola. Para verlo sostuvimos una carta junto a ésta; su borde creó una intensa figura de difracción propia en la región de sombra.

Recurrimos entonces a otro sistema. Pusimos en el haz una diapositiva con un solo estenope; le acercamos la bola. El estenope difractó la luz en una figura de círculos claros y oscuros en torno a un centro luminoso. En nuestras experiencias anteriores la bola se hallaba lejos para que lo bañara la luz procedente del centro de la figura.

Acercamos la bola lo bastante para que el primer círculo oscuro de la figura del estenope coincidiera con el perímetro de la bola. Así quedó ésta a oscuras, pues en todo el perímetro de la sección transversal de la bola la luz procedente del estenope se interfería destructivamente. En la sombra de la bola desapareció la mancha de Poisson.

A continuación acercamos más la bola, de modo que el primer círculo luminoso de la figura de difracción del estenope rozara su perímetro. Reapareció la figura de Poisson. Desplazamos la bola levemente hacia un lado, para descentrarla de la figura de difracción del estenope. En un costado, el centro de la figura iluminaba claramente el perímetro de la pieza; en el costado opuesto, parte de un círculo oscuro rozaba su superficie. Esta vez la sombra de la bola mostraba un brillante fulgor que la atravesaba por el centro. La figura de Poisson aparecía rebajada.

Evidentemente, la creación de la figura de Poisson depende de la difracción de la luz alrededor de costados opuestos de la bola. Cuando un costado se encuentra en una parte oscura de la figura de difracción del estenope, los rayos que pasan por ahí están en oposición de fase. Y, aunque se difracten hacia la región de sombra, siguen en oposición de fase y, así, se interfieren destructivamente.

Cuando el anillo oscuro del estenope rozaba todo el perímetro de la bola, ninguna luz que llegara a la región de sombra sobrevivía a la interferencia destructiva. La región quedaba a oscuras. Si el anillo oscuro rozaba sólo parte del perímetro, la luz que pasaba por ese costado no podía interferir constructivamente la que pasaba por el opuesto. En esta circunstancia, la sombra recibía luz desde un costado de la bola, pero faltaba la figura de círculos concéntricos.

Si bien la formación de imágenes mediante esferas y discos se viene estudiando desde 1818, no encuentro documentación sobre estudios pormenorizados. Por tanto, el experimentador aficionado dispone de un buen campo de acción. ¿A qué distancia de la diapositiva y del punto de observación debe estar una bola de cojinete para reforzar la imagen? ¿Dónde debe estar la bola en la figura de difracción producida por la diapositiva? La bola, ¿debe ser grande o pequeña? Una esfera mucho mayor que una bola de cojinete, ¿puede formar imágenes en su sombra? ¿Hay manera de reducir la distorsión de la imagen debida al solapamiento de las figuras de Poisson?



12. Imágenes posibles de una **I**

Libros

El mundo como libro abierto y un tratado avanzado sobre física del estado sólido

Luis Bru y J. M. Calleja, R. Miranda y N. Cabrera

POTENCIAS DE DIEZ. SOBRE EL TAMAÑO RELATIVO DE LOS OBJETOS DEL UNIVERSO, por Philip Morrison y Phylis Morrison y The Office of Charles and Ray Eames. Prensa Científica, Editorial Labor; Barcelona, 1984. De magnífico, útil e interesante puede calificarse este libro. Es muy difícil que nuestra mente sea capaz de darse cuenta lo que supone aumentar en una unidad la potencia a la que está elevada cualquier número. En particular, por su sencillez, el libro ha elegido el número 10, haciendo ver que el resultado de añadir un cero más conlleva una gran sorpresa. Los autores lo recalcan bien al terminar la sección llamada "Consejos al lector": En su conjunto estas potencias de diez presentan el tamaño relativo de las cosas del Universo y hacen ver el efecto de añadir otro cero.

Es muy frecuente oír en conversaciones coloquiales el asombro de muchos cuando se comenta que la vida media de un hombre es del orden de 10^9 segundos, que 10^{11} segundos representa cuanto podemos aprender de la historia, que comprende unos pocos cientos de generaciones, y que dos órdenes más de magnitud, es decir, 10^{13} segundos es el tiempo transcurrido desde la aparición del hombre en la Tierra. Lo mismo acontece al referirse a distancias espaciales, cuya comparación es el norte del libro que estamos glosando.

Una de las grandes preocupaciones que me acompañaron durante mi larga vida académica fue la de inculcar desde el comienzo a los alumnos los órdenes de magnitud de los diferentes entes físicos que manejábamos. Era frecuente, y supongo que lo será siendo, que, pese a las innumerables modificaciones que ha experimentado lo que tradicionalmente se ha venido llamando enseñanza media, encontrar flamantes bachilleres que tenían dificultades para contestar a la pregunta de cuánto consume una bombilla eléctrica normal, una lavadora, una estufa, una televisión, un tubo de rayos X o una locomotora eléctrica.

En la vida ordinaria, todos los fenómenos que observamos lo hacemos a *nuestra escala* de longitudes y tiempos, que viene definida por los sentidos de los que estamos dotados y regida por leyes físicas bien conocidas. Pero, ¿qué sucede cuando nos salimos de esa escala? ¿Podemos asegurar que esas mismas leyes son válidas en el mundo de lo muy grande o de lo muy pequeño? El sentido del tiempo, *la flecha del tiempo*, que diría Eddington, ¿corre siempre en el sentido de la entropía creciente? La mecánica de Newton sólo es valedera para fenómenos que ocurren a nuestra escala de velocidades; cuando éstas crecen hasta acercarse a la de la luz (3×10^8 metros/segundo) hay que sustituirla por la relativista de Einstein. Los metros se acortan y los relojes se atrasan cuanto más deprisa se mueven. La idea de simultaneidad, tan sencilla como aparece en sucesos que se producen a nuestra escala, hay que revisarla cuando nos acercamos a la escala relativista.

La observación de nuestro entorno está ligada de manera directa con el sentido de la vista. El ojo es capaz de apreciar, sin utilizar artificios apropiados, desde distancias muy grandes hasta muy pequeñas. Está dotado de un poder de resolución, que es la mínima distancia que separa dos detalles del objeto que aparecen discernibles en la imagen que de él forma el ojo. Su valor, en condiciones normales de iluminación, es del orden de 10^{-5} metros, que es el tamaño de algunas células y bacterias. Valiéndose de un microscopio electrónico, el poder de resolución aumenta hasta 10^{-10} metros, lo que permite visualizar virus, macromoléculas e incluso átomos aislados. Hasta el momento, la observación directa termina aquí. Si se quieren apreciar distancias menores todavía, hay que recurrir a los llamados métodos indirectos, basados principalmente en el fenómeno físico de la difracción, que permiten llegar hasta los 10^{-13} metros e incluso hasta los 10^{-15} metros (fermi) presentes en el dominio de la física nuclear.

El extremo opuesto lo ocupa las inmensas distancias que dominan en el cosmos en las que las potencias positivas de 10 llenan un intervalo que se extiende desde los dominios de nuestro sistema solar, de nuestra galaxia (la Vía Láctea), las galaxias próximas, las lejanas y los quarks situados en los confines del universo.

A pesar del elevadísimo valor de la velocidad con la que se propaga la luz, las enormes distancias que nos separa de todo cuanto observamos hace que lo que "vemos" ahora mismo no responda a la realidad, sino al aspecto que presentaba mucho tiempo atrás. Ni tan siquiera podemos asegurar que lo que contemplamos existe.

Para facilitar el lenguaje, los astrónomos utilizan tres unidades de longitud. La más conocida es el año luz, que representa la distancia que la luz es capaz de recorrer en un año, cuyo valor en números redondos es 10^{16} metros; la unidad astronómica, o distancia media que separa la Tierra y el Sol, que vale $1{,}5 \times 10^{11}$ metros; y el parsec, que equivale a 3,26 años luz, con sus múltiplos el kiloparsec y megaparsec. Nuestra propia Vía Láctea, que alberga más de cien millones de estrellas, ocupa un disco de alrededor de 30 kiloparsec de diámetro y de medio kiloparsec de espesor. Esto quiere decir que la luz que sale de una estrella situada en el extremo de un diámetro tarda cien mil años luz en llegar al otro extremo del mismo.

Interesa recalcar el valor de la longitud de onda de las ondas electromagnéticas, que se extiende desde las producidas artificialmente en las emisoras de radio y televisión, comprendidas entre los 10^3 metros y los 10^{-2} metros, pasando por las microondas, las caloríficas, la zona del espectro visible; es decir, las que el ojo es capaz de detectar (desde el color rojo hasta el violeta), las ultravioletas, los rayos X y rayos gamma que emiten las sustancias radiactivas y las partículas inestables cuya longitud de onda está comprendida entre los 10^{-12} y 10^{-16} metros.

El mundo de las distancias es apasionante, como lo es el libro que estamos glosando, en el que aparecen una serie de magníficas fotografías y dibujos en los que se comentan con exquisito acierto, en forma de un increíble viaje: desde los 10^{25} m (mil millones de años luz), galaxias que aparecen como motas de polvo, 10^{23} metros, galaxias de nuestra región cósmica formadas por millares de millones de estrellas, Estrella Arturo 10^{18} m, mucho más luminosa que el Sol, estrellas visibles 10^{17} m, el Sol 10^{16} m, Júpiter y otros planetas con sus múltiples satélites 10^{13} m, la Tierra observada y fotografiada directamente en 1967, 10^7 m, el aspecto de nuestras costas y ciudades $10^5/10^4$ metros, hasta llegar a lo que nuestros ojos observan.

En el dominio de las distancias decrecientes las bellísimas ilustraciones nos pasean por el mundo de las células, de la doble hélice, el ADN, de los átomos y de los núcleos, hasta tratar de penetrar allí donde imperan fuerzas que aun no comprendemos demasiado bien, consiguiendo llegar a los 10^{-15} metros; es decir, al fermi. Como anotan los autores, los dos extremos de nuestra procesión de imágenes, las escalas extremas de los tamaños grande y pequeño, son tan sólo los límites del conocimiento contemporáneo. Cuarenta y dos potencias de diez abarcan la totalidad de lo que hasta el momento es conocimiento firme; a partir de ahí nos movemos entre indicios y conjeturas. No sabemos todavía, si bien podemos discutir al respecto, si en el seno del mundo real existe lo infinito, dado que lo infinito se encuentra al alcance de la mente humana. ¿Hasta dónde podremos proseguir nuestra excursión en cada sentido, tanto hacia el macrocosmos como hacia el interior, hacia el microcosmos? Algun día podremos esperar llegar a saberlo.

De otra parte, si se llega a comprobar que la materia es mortal y que el tiempo de vida del protón es de 10^{30} años, ¿cómo repercutiría esta circunstancia en la posibilidad de penetrar, aún más, fuera de ese intervalo que compone las 42 potencias de diez? Y en el sentido temporal, ¿cuántas potencias de diez contendría el dominio en el que el tiempo importe? (L. B.)

LIGHT SCATTERING IN SOLIDS IV, preparado por M. Cardona y G. Güntherodt. Springer-Verlag, 1984. Continuación natural de los tres volúmenes anteriores de la serie sobre dispersión de luz en sólidos, se dedica éste a aspectos de reciente desarrollo, así como a revisar y completar algunos otros más conocidos.

El contenido del libro es de gran calidad y actualidad científica. Manuel Cardona lleva trabajando más de 20 años en propiedades ópticas de sólidos y ha publicado casi 400 trabajos sobre el tema, al que ha hecho aportaciones de repercusión mundial. El resto de los coautores (G. Güntherodt, G. Abstreiter, K. Arya, S. Geschwind, R. Merlin, A. Otto, A. Pinczuk, R. Romestain, B. A. Weinstein, R. Zallen y R. Zeyher) son también figuras relevantes en distintos aspectos de la espectroscopía óptica de sólidos.

Mientras los tres volúmenes anteriores abordaban el desarrollo teórico y experimental de la dispersión de luz en sólidos por vibraciones de red (fonones), haciendo énfasis en efectos resonantes, éste se centra en los procesos de dispersión de luz asociados a excitaciones electrónicas y magnéticas del sólido, así como en los efectos producidos por adsorción de moléculas en superficies sólidas y el papel desempeñado por la presión hidrostática en las propiedades ópticas del sólido.

A lo largo de todo el libro van unidos los desarrollos teóricos y los resultados experimentales más importantes y recientes en cada área, en forma ordenada y clara, por lo que resulta muy útil para ponerse al día en física del estado sólido, en especial, los postgraduados y alumnos del tercer ciclo interesados en propiedades ópticas de sólidos en general y espectroscopía Raman en particular. Comentemos brevemente el contenido de los diferentes capítulos.

Firman el primero A. Pinczuk, G. Abstreiter y M. Cardona; trata de aspectos teóricos y resultados experimentales del efecto Raman por excitaciones electrónicas en semiconductores; constituye una puesta al día del trabajo de M. V. Klein publicado en el capítulo 4 del primer volumen de esta serie. Se da especial importancia en este contexto a la dispersión Raman por excitaciones en gases de electrones bidimensionales que aparecen en las heterouniones entre semiconductores, o más recientemente en los llamados pozos cuánticos múltiples o superredes, de enorme interés tecnológico potencial en el campo de los dispositivos semiconductores. Asimismo, se da abundante información acerca de la dispersión Raman por excitaciones colectivas de electrones (plasmones) tanto ópticos como acústicos o excitaciones de electrones.

En el capítulo segundo, S. Geschwind y R. Romestain se extienden sobre este último tipo de dispersión Raman en sulfuro de cadmio, sin duda el compuesto II-VI más estudiado, con aplicación a temas de gran interés como las transiciones metal-aislante, la medida de tiempos de relajación de espín, o los efectos de términos lineales en k en las bandas de energía.

Los capítulos tercero y cuarto (G. Güntherodt, R. Zeyher y R. Merlin) están dedicados a los efectos producidos por el orden magnético de los cristales en el efecto Raman de fonones, y cuyo origen está en la interacción entre las vibraciones de la red cristalina y el sistema de espines del cristal. Se desarrolla la teoría de estos efectos tanto desde el punto de vista fenomenológico como macroscópico, dando abundantes ejemplos. El caso de los calcogemeros de tierras raras ocupa todo el cuarto capítulo, donde se presenta una compleja fenomenología de estos compuestos, que van desde los semiconductores y metales magnéticos hasta los componentes de valencia mixta.

El capítulo sexto (A. Otto) expone uno de los fenómenos que mayor atención han reclamado en los últimos años en la comunidad científica de física del estado sólido: el efecto Raman gigante (SERS), que consiste en el aumento de hasta un millón de veces en la sección eficaz de dispersión Raman para moléculas adsorbidas en superficies metálicas preparadas de suerte que contengan un alto grado de rugosidad geométrica. Al estudio de este espectacular fenómeno se han dedicado en los últimos años miles de artículos y decenas de libros y congresos. De ahí que la revisión de los principales resultados experimentales y posibles mecanismos responsables del SERS que aparece en este capítulo sea de gran utilidad.

En particular, se hace hincapié en el papel relativo del mecanismo basado en resonancias electromagnéticas frente al fundado en una hipotética transferencia de carga entre la molécula absorbida y la superficie. Se revisan, asimismo, las propiedades ópticas y de resistividad de las superficies que muestran SERS y se discute en detalle la escala relevante de rugosidad: defectos atómicos, porosidad de las películas metálicas o rugosidad macroscópica.

El capítulo 7 (K. Arya y R. Zeyher) insiste, en este mismo contexto, en el estado actual de la teoría del efecto Raman gigante, con especial énfasis en la teoría electromagnética, en cuyo marco se han realizado la mayor parte de los cálculos. El último capítulo (B. A. Weinstein y R. Zallen) está dedicado al estudio de los efectos que produce la presión hidrostática en el espectro Raman de fonones en sólidos covalentes y moleculares. Entre otras cosas se estudia la obtención de los parámetros de Grüneisen por este procedimiento y se analizan los cambios en frecuencia y forma de los picos Raman debidos a la presión, casos de transición de fase metal-semiconductor y otros. También se describen las técnicas experimentales que han permitido realizar estas investigaciones: celda de presión de diamante y manómetro de rubí, con los que se consigue mantener y medir presiones de varios cientos de kilobares.

En resumen, se trata de un libro altamente especializado que junto con los tres anteriores de la misma serie constituye un elemento de referencia y de consulta bibliográfica de primera calidad para investigadores en física del estado sólido interesados en espectroscopía Raman de sólidos. (J. M. C., R. M. y N. C.)

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACION BASICA

SYMPOSIUM ON TECHNOLOGY AND WORLD TRADE, GAITHERSBURG, MARYLAND. Dirigido por Robert L. Stern. Oficina Nacional de Pesos y Medidas, Departamento de Comercio de los Estados Unidos, 1966.

SYNCHROTRON RADIATION RESEARCH. Dirigido por Herman Winick y S. Doniach. Plenum Press, 1980.

THE ROLE OF BASIC RESEARCH IN SCIENCE AND TECHNOLOGY: CASE STUDIES IN ENERGY R & D. National Science Foundation, 1982.

EL FIRMAMENTO EN INFRARROJO

SPECIAL ISSUE ON THE INFRARED ASTRONOMICAL SATELLITE. En *The Astrophysical Journal*, vol. 278, n.º 1, 2.ª parte, págs. L1-L85; 1 de marzo de 1984.

EARLY RESULTS FROM THE INFRARED ASTRONOMICAL SATELLITE. G. Neugebauer, C. A. Beichman, B. T. Soifer, H. H. Aumann, T. J. Chester, T. N. Gautier, F. C. Gillett, M. G. Hauser, J. R. Houck, C. J. Lonsdale, F. J. Low y E. T. Young en *Science*, vol. 224, n.º 4644, págs. 14-21; 6 de abril de 1984.

ATEROSCLEROSIS, COLESTEROL Y RECEPTORES DE LDL

LIPOPROTEIN RECEPTORS AND CHOLESTEROL HOMEOSTASIS. Robert W. Mahley y Thomas L. Innerarity en *Biochimica et Biophysica Acta*, vol. 737, n.º 2, págs. 197-222; 24 de mayo de 1983.

MEVINOLIN AND COLESTIPOL STIMULATE RECEPTOR-MEDIATED CLEARANCE OF LOW DENSITY LIPOPROTEIN FROM PLASMA IN FAMILIAL HYPERCHOLESTEROLEMIA HETEROZYGOTES. David W. Bilheimer, Scott M. Grundy, Michael S. Brown y Joseph L. Goldstein en *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 80, n.º 13, págs. 4124-4128; julio, 1983.

DEFECTIVE LIPOPROTEIN RECEPTORS AND ATHEROSCLEROSIS: LESSONS FROM AN ANIMAL COUNTERPART OF FAMILIAL HYPERCHOLESTEROLEMIA. Joseph L. Goldstein, Toru Kita y Michael S. Brown en *The New England Journal of Medicine*, vol. 309, n.º 5, págs. 288-296; 4 de agosto de 1983.

INTERACCION ENTRE EL VIENTO SOLAR Y LA IONOSFERA DE VENUS

PIONEER VENUS RESULTS: AN OVERVIEW. Número monográfico de *Science*, vol. 205, n.º 4401, págs. 41-121; 6 de julio de 1979.

PIONEER VENUS RESULTS. Número monográfico del *Journal of Geophysical Research*, vol. 85, n.º A13, págs. 7573-8337; 30 de diciembre de 1980.

VISCOUS FLOW CIRCULATION OF THE SOLAR WIND BEHIND VENUS. H. Pérez-de-Tejada en *Science*, vol. 207, n.º 4434, págs. 981-983; 29 de febrero de 1980.

ORIENTATION OF PLANETARY D^+ FLUXES AND MAGNETIC FIELD LINES IN THE VENUS WAKE; H. Pérez-de-Tejada, D. S. Intriligator y C. T. Russell en *Nature*, vol. 299, n.º 5881, págs. 325-327; 23 de septiembre de 1982.

ECOLOGIA DE LA SELVA TROPICAL HUMEDA

ALLELOPATHY BY MYRMECOPHYTES: THE ANT *AZTECA* AN AN ALLELOPATHIC AGENT OF *CECROPIA*. Daniel H. Janzen en *Ecology*, vol. 50, n.º 1, págs. 147-153; invierno, 1969.

COSTA RICAN NATURAL HISTORY. Dirigido por Daniel Janzen. University of Chicago Press, 1983.

WHY BEES MOVE AMONG MASS-FLOWERING NEOTROPICAL TREES. Gordon W. Frankie y William A. Haber en *Handbook of Experimental Pollination Biology*, dirigido por C. E. Jones y R. J. Little. Van Nostrand Reinhold, Inc., 1983.

EL LASER C³

MONOLITHIC TWO-SECTION GAINASP/INP ACTIVE-OPTICAL-RESONATOR DEVICES FORMED BY REACTIVE ION ETCHING. L. A. Coldren, B. I. Miller, K. Iga y J. A. Rentschler en *Applied Physics Letters*, vol. 38, n.º 5, págs. 315-317; 1 de marzo de 1981.

HIGH-SPEED DIRECT SINGLE-FREQUENCY MODULATION WITH LARGE TUNING RATE AND FREQUENCY EXCURSION IN CLEAVED-COUPLED-CAVITY SEMICONDUCTOR LASERS. W. T. Tsang, N. A. Olsson y R. A. Logan en *Applied Physics Letters*, vol. 42, n.º 8, págs. 650-652; 15 de abril de 1983.

VIVIENDAS DE HUESOS DE MAMUT EN LA LLANURA RUSA

ICE-AGE HUNTERS OF THE UKRAINE. Richard G. Klein. University of Chicago Press, 1973.

MEZHIRICHSKIE ZHILISHCHA IZ KOSTEI MAMONTA. I. G. Pidoplichko. Naukova Dumka, Kiev, 1976. En lengua rusa.

THE UPPER PALEOLITHIC IN NORTH-CENTRAL EURASIA: EVIDENCE AND PROBLEMS. Edith M. Shimkin en *Views of the Past: Essays in Old World Prehistory and Paleoanthropology*, dirigido por Leslie G. Freeman. Mouton Publishers, 1978.

EXPERIMENTOS SOBRE ESTRUCTURAS GOTICAS

THE CONTRACTORS OF CHARTRES. John James. Mandorla Publications, Dooralong, New South Wales, 1981.

EXPERIMENTS IN GOTHIC STRUCTURE. Robert Mark. The MIT Press, 1982.

THE FIRST FLYING BUTTRESSES: A NEW RECONSTRUCTION OF THE NAVE OF NOTRE-DAME DE PARIS. William W. Clark y Robert Mark en *The Art Bulletin*, vol. 66, n.º 1, págs. 47-65; marzo, 1984.

JUEGOS DE ORDENADOR

MATHEMATICAL RECREATIONS AND ESSAYS. W. W. Rouse Ball, revisado por H. S. M. Coxeter. University of Toronto Press, 1974.

THE TOWERS OF HANOI PROBLEM. Peter Buneman y Leon Levy en *Information Processing Letters*, vol. 10, n.ºs 4 y 5, págs. 243-244; 5 de julio de 1980.

THE RING OF LINKED RINGS. S. N. Afriat. Gerald Duckworth & Company, Ltd., 1982.

TALLER Y LABORATORIO

FRAUNHOFER ALPHABET. Alan Winter en *Physics Education*, vol. 15, n.º 5, págs. 290-291; septiembre, 1980.

THE SPOT OF ARAGO: NEW RELEVANCE FOR AND OLD PHENOMENON. James E. Harvey y James L. Forgham en *American Journal of Physics*, vol. 52, n.º 3, págs. 243-247; marzo, 1984.